

Exoesqueleto Antropomórfico para la Rehabilitación de las Extremidades Superiores



Grado en Ingeniería en Diseño Mecánico

Trabajo Fin de Grado

Autor: Camacho Fantoba, Miguel Ángel.

Director: Latorre Biel, Juan Ignacio.

Tudela, Junio 2016

RESUMEN.

Este TFG se centra en el diseño de un exoesqueleto antropomórfico que consistirá en un mecanismo adaptable a las extremidades superiores de un ser humano. El propósito de este dispositivo es el de servir de elemento de rehabilitación de las extremidades superiores, permitiendo trabajar diferentes músculos según el movimiento realizado.

Este mecanismo se diseñará cuidadosamente para imitar el movimiento natural de los brazos humanos.

Como justificación de este trabajo debe considerarse el hecho de que existe un elevado número de personas que han sufrido una lesión postraumática o un accidente cerebrovascular (ACV) entre otros motivos, y no han perdido la conexión nerviosa con las extremidades o la han recuperado tras una intervención quirúrgica. Estas personas pueden recibir tratamiento fisioterapéutico y de electroestimulación (entre otras técnicas).

Con el exoesqueleto se pretende complementar dichos tratamientos con un dispositivo de rehabilitación que permita recordar los movimientos naturales y recuperar masa muscular.

PALABRAS CLAVE.

- Exoesqueleto.
- Grados de libertad.
- Accidente Cerebro Vascular (ACV).
- Lesión Postraumática.
- Servomotor.
- Señal Electromiográfica (EMG).
- Ingeniería de Rehabilitación.

INDICE

RESUMEN.....	2
PALABRAS CLAVE.....	2
INTRODUCCIÓN.	5
1. JUSTIFICACIÓN DE LA NECESIDAD.	8
1.1. Sondeo Población Española.	11
1.2. Principales Causas de Minusvalía en las Extremidades Superiores.	13
1.3. EXOESQUELETOS. ¿Qué es? ¿Para qué sirven?.....	16
2. OBJETIVOS DEL TFG Y ESPECIFICACIONES DEL SISTEMA A DISEÑAR.....	18
2.1. Ventajas del uso de Exoesqueletos en Pacientes.	19
2.2. EXOESQUELETO; Extremidades Superiores.	21
2.3. Componentes Básicos de un Exoesqueleto.	22
2.4. Requisitos/Aspectos mínimos que debe cumplir la rehabilitación con Exoesqueleto.	24
2.4.1. Requisitos Mínimos de Seguridad.....	25
2.5. Objetivos y Restricciones del Dispositivo.....	27
.....	30
2.5.1. Fuerzas de Interacción.....	31
2.6. Diagrama esquemático del sistema (Maquina-computadora).	33
3. ESTADO DEL ARTE.....	35
3.1. Ingeniería de Rehabilitación.....	35
3.2. Contextualización y análisis.....	39
3.4. Extremidad Superior.	40
3.4.2 Exoesqueleto <i>WREX</i>	43
3.4.3 Exoesqueleto <i>ARMEOSPRING®</i>	45
3.4.4 Exoesqueleto <i>ARMEOPOWER®</i>	46
3.4.5 Exoesqueleto <i>HAL</i>	47
3.4.6 Exoesqueleto <i>RUPERT</i>	48
3.4.7 Exoesqueleto <i>ABLE</i>	49
3.4.8 Exoesqueleto <i>EXO-UL7</i>	50
3.4.9 Exoesqueleto <i>MEDARM</i>	51
3.4.10 Exoesqueleto <i>ESA Human Arm Exoskeleton</i>	52
3.4.11 Exoesqueleto <i>NeuroEXOS</i>	53
4. ELECCIÓN JUSTIFICADA DE UNA SOLUCIÓN.....	54
5. DESARROLLO DE UNA SOLUCIÓN.	56
5.1 Grados de Libertad en el Exoesqueleto.....	56
5.2 Software Utilizado en el Modelado.....	59

5.3	Ubicación de los Servomotores	60
5.4	Descripción del diseño.	64
5.4.1	Estructura.	64
5.4.2	Unión Estructura Exoesqueleto.	66
5.4.3	Articulación del Hombro.....	68
5.4.4	Brazo.	75
5.4.5	Antebrazo y Mecanismo de Rotación de la Muñeca.	79
5.5	Materiales Utilizados en el Diseño.....	82
5.6	Diseño Final.	83
6.	MODELO DE NEGOCIO.	84
6.1	Presupuesto.	87
7.	TRABAJOS FUTUROS.	89
8.	CONCLUSIONES.	91
	BIBLIOIGRAFÍA.....	94
	ANEXOS.....	96

INTRODUCCIÓN.

Hace algún tiempo ha emergido la Robótica médica y la Robótica de rehabilitación, esta última con el objetivo de aplicar las tecnologías en robótica (Medición, actuación, control, etc.) para la rehabilitación y asistencia de personas discapacitadas. El desarrollo de sistemas robóticos viables capaces de asistir a una persona con limitación funcional es bastante reciente. De esta forma, se han desarrollado dispositivos para asistir en la movilidad y en las funciones motoras de las piernas, las manos y los brazos, entre otros tipos de sistemas para distintas partes del cuerpo.

En la Unión Europea y particularmente en España, se prevé un aumento en el número de personas discapacitadas con deficiencias motoras y debilidad muscular asociadas al envejecimiento de la población y a diversos tipos de accidentes en general englobarían los principales motivos de dicho problema. Para dicha población y como tratamiento alternativo, existen las ayudas técnicas que son los dispositivos que utilizan diversas tecnologías para asistir o ayudar a recuperar ciertas habilidades o movimientos básicos para la realización de actividades cotidianas del día a día. En este ámbito de aplicación y con la tendencia de un posible mayor número de usuarios que puedan necesitar este tipo de tratamiento/rehabilitación, la Robótica de Rehabilitación o también llamada Ingeniería de Rehabilitación, tiene especial relevancia.

((INE), 2015) (Sociales, s.f.)

Dentro de este campo surge una interacción doble entre el dispositivo y la persona (Interfaz Humano - Robot). Esta interacción posee dos vertientes:

- Una interacción cognitiva en que la persona es capaz de controlar el robot mientras este transmite una realimentación a la persona.
- Una interacción biomecánica relacionada con la aplicación de fuerzas controladas entre la persona y el robot.

La interacción biomecánica surge como una consecuencia directa en los dispositivos que, por ejemplo, compensan la actividad funcional en personas con patologías motoras. La interacción cognitiva surge en los casos en que la persona genera comandos de control para utilizar el dispositivo o cuando este genera cierta realimentación al usuario. La siguiente imagen muestra y esquematiza esta doble interacción y los posibles canales de intercambio de información.

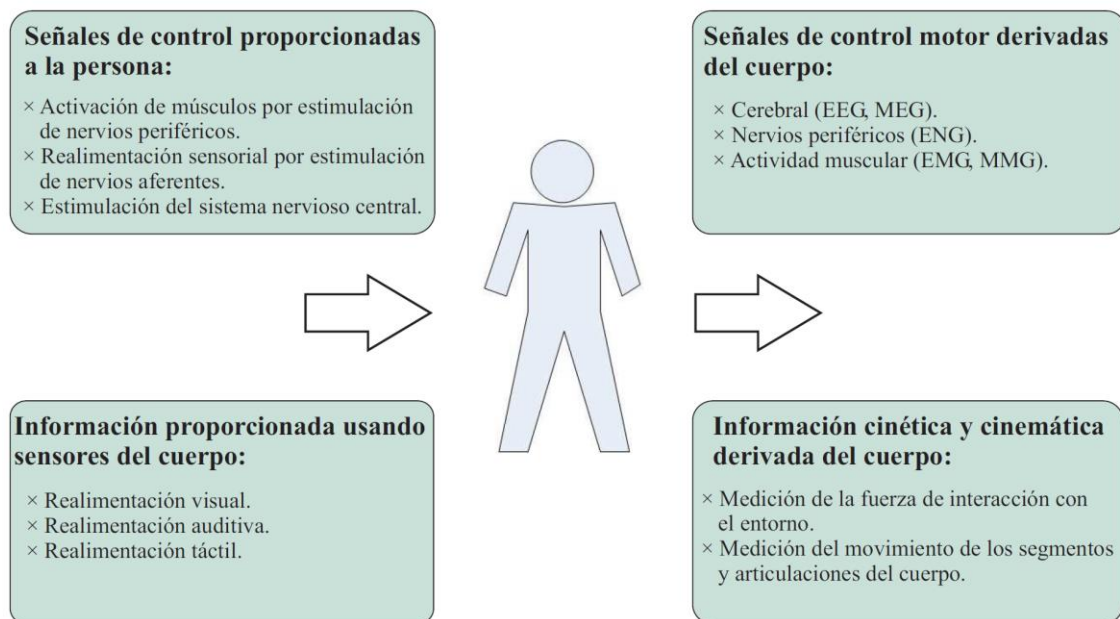


Imagen 1: Interacción bidireccional y canales para intercambio de información con el sistema de control motor humano.

En la interacción humano robot, uno de los mayores inconvenientes en la utilización de estos dispositivos a gran escala ha radicado en su control, ya que muchos dispositivos han sido difíciles de utilizar por parte del usuario y su control muy tedioso. En este sentido, muchos desarrollos se enfocan hacia la implementación de dispositivos robóticos que puedan controlarse en la forma más natural posible, sin largos periodos de entrenamiento, mediante algoritmos que detecten de forma eficaz la intencionalidad del usuario y la utilización de nuevos canales en la interfaz de usuario.

Así mismo, recientemente se plantea el desarrollo de dispositivos robóticos que forman un sistema simbiótico con la persona, en el cual las propiedades funcionales de cada uno se encuentran integradas en un entorno híbrido. En este caso, la interfaz, estructura mecánica y el control, deben estar basados en un modelo humano (bioinspirado) es decir un modelo Biomimético, que involucre las características cognitivas, físicas y sensomotoras de la persona, y un modelo del sistema motor humano.

De esta forma, el progreso en rehabilitación, neurociencia y protésica depende de adquirir una comprensión detallada de cómo el Sistema Nervioso Central (SNC) representa las tareas motoras y como esas representaciones dependen de las restricciones impuestas por el mundo externo. Igualmente, este progreso depende de inferir estrategias de control usadas por personas con problemas neuromotores que generan discapacidad. Estos temas son abordados en el campo del control motor humano, un campo de investigación entre la neurociencia y otras disciplinas como la biomecánica.

1. JUSTIFICACIÓN DE LA NECESIDAD.

Según el Instituto Nacional de Estadística INE, en un artículo publicado el 20 de Mayo de 2015, y con último sondeo realizado en 2008, en España residen 3,85 millones de personas que declaran tener alguna discapacidad. Del total de todos ellos, el 59,8% son mujeres y el 40,2% son hombres. Las tasas de discapacidad por edades son ligeramente superiores en los hombres hasta los 44 años y a partir de los 45 se invierte la situación, creciendo esta diferencia a medida que aumenta la edad.

Teniendo en cuenta los hogares españoles, en el 80% de los hogares no hay ninguna persona con discapacidad, en el 16,8% hay una persona, en el 3,0% hay dos personas con discapacidad y en el 0,2% tres o más personas.

Se entiende por discapacidad toda limitación importante para realizar las actividades de la vida diaria que haya durado o se prevea que vaya a durar más de un año y tenga su origen en una deficiencia. Se entiende por deficiencia cualquier pérdida o anomalía de un órgano o de la función propia de ese órgano.

De todas los tipos de discapacidades existentes, nos vamos a centrar en las discapacidades de limitación de movimiento.

Estas limitaciones principalmente se deben a una enfermedad, o posibles accidentes cerebro-vasculares (ACV), seguido por la edad avanzada, por posibles accidentes traumáticos (Lesiones postraumáticas), y en último lugar por herencia genética.

Las discapacidades a las que nos referimos, se dividen en las posibles dificultades en cuanto a la posibilidad de movimiento, al correcto funcionamiento, en las extremidades inferiores, extremidades superiores, en tronco, cuello y cabeza. Como es lógico, las personas que padezcan de dichos problemas, tendrán que ser tratadas con una terapia de rehabilitación, o Neurorrehabilitación específica.

De todos los tipos de minusvalía en el siguiente proyecto se habla de los problemas que sufren ciertos pacientes en la movilidad de sus extremidades, más concretamente en las extremidades superiores. En estos años la medicina ha evolucionado increíblemente en el ámbito de nuevas terapias de rehabilitación e incluso en nuevas cirugías para tratar a pacientes con problemas motrices, tanto en las extremidades inferiores como en las extremidades superiores.

No obstante parece insuficiente este avance a día de hoy sin que haya equipamientos, máquinas y herramientas que ayuden a los fisioterapeutas y a estos pacientes en su recuperación en la medida de lo posible. En muchas ocasiones la magnífica labor de los profesionales de fisioterapia no puede obtener mejores resultados por sí solos.

En muchos tratamientos de rehabilitación, existen diversidad de máquinas para potenciar la mejoría de los pacientes a tratar, como por ejemplo Electro estimuladores, máquinas que disminuyen la gravedad para para que los pacientes puedan mover las piernas con un menor esfuerzo, etcétera.

Es en este instante cuando la Ingeniería entra en acción, diseñando y desarrollando máquinas que resuelvan un problema real. Podríamos decir que la Ingeniería conlleva “Diseñar algo que resuelva un problema”.

En este caso en concreto, nos vamos a centrar en diseñar un dispositivo para ejercitar los movimientos de las extremidades superiores, siendo más concretos el diseño de un exoesqueleto para la rehabilitación de las extremidades superiores.

Es algo muy novedoso, e incluso puede rozar la ciencia ficción, pero a día de hoy es una realidad, en el caso de las extremidades inferiores existen dispositivos (exoesqueletos) comercializados actualmente para el tratamiento de la movilidad en estos pacientes. Este dispositivo permite a pacientes con diversos problemas en las piernas, como por ejemplo a las personas que están en silla de ruedas, practicar el cotidiano hecho de andar. En este caso según la gravedad del caso, dicho paciente podría incluso llegar a caminar en un futuro, con ayuda de muletas, o quién sabe, incluso podría llegar a lograr una mejoría tal que podría llegar a caminar, con mayor o menor dificultad, sin ayuda ninguna.

El objetivo que persigue dicho dispositivo es reeducar, re-enseñar, reaprender, el movimiento de esas extremidades. Ya que llega un punto que el propio cuerpo humano al no tener la capacidad o la costumbre de mover dichas partes del cuerpo, olvida ese hábito tan cotidiano.

Como hemos comentado anteriormente los exoesqueletos de las extremidades inferiores están comercializados, la empresa EKSO Bionics es la más puntera en este tipo de dispositivos, y los comercializa a centros especializados en el tratamiento de este tipo de lesiones.

En el presente proyecto nos vamos a centrar en las extremidades superiores del cuerpo humano, y por lo tanto en lo que se refiere a dicha titulación como o es la de “Ingeniería en Diseño Mecánico” se va a desarrollar una solución a nivel de diseño, estructural y funcional, la creación de un dispositivo, la creación de un exoesqueleto de las extremidades superiores.

En la actualidad existen distintos dispositivos similares al que se va a desarrollar en este proyecto, la mayoría de ellos están en fase experimental, o en fase de proyección, cómo podremos ver en el apartado de estado del arte donde se comentan los mejores de todos ellos. Es decir en la actualidad no existe ningún dispositivo/exoesqueleto definitivo y comercializado, cómo es el caso del exoesqueleto de las extremidades inferiores. Las razones de esto, son varias, pero básicamente los movimientos a imitar por un exoesqueleto de las extremidades superiores es inmensamente más complicado que desarrollar los movimientos de las extremidades inferiores, por este motivo principalmente el diseño del dispositivo, su sistema electrónico, su programación de movimientos es mucho más complicada, y están tratando de perfeccionarlo completamente, para finalmente integrarlo comercialmente como lo están los exoesqueletos de las extremidades inferiores.

Para el desarrollo de este proyecto, el hecho de que no exista un dispositivo definitivo, juega a favor nuestra, ya que existe la opción de diseñar algo que pueda ser algo más, es decir, se nos presenta la oportunidad de diseñar un dispositivo que pueda llegar a resolver un problema existente. Está claro que en este proyecto no se puede abarcar todo el ámbito, por eso mismo en el presente proyecto se llega a una posible solución de diseño estructural y funcional, que podrá realizar multitud de movimientos, para satisfacer las necesidades que nos planteamos en capítulos más adelante, y conseguir automatizar ciertos movimientos en la rehabilitación de las extremidades superiores.

1.1. Sondeo Población Española.

Como muestra de todo esto se realizó un estudio centrado en la población Española, para determinar en función de la edad el número total de personas con algún tipo de discapacidad.

Todos estos resultados los mostramos en 2 gráficos diferentes, para así mostrarlos de una manera más clara y concisa. Cada uno de los gráficos, como veremos a continuación representan, primero Tasa de personas con discapacidad, dividida en grupos de edades, y segundo distintos tipos de cuidados que estas personas deben recibir, especificando cada tipo de cuidado.

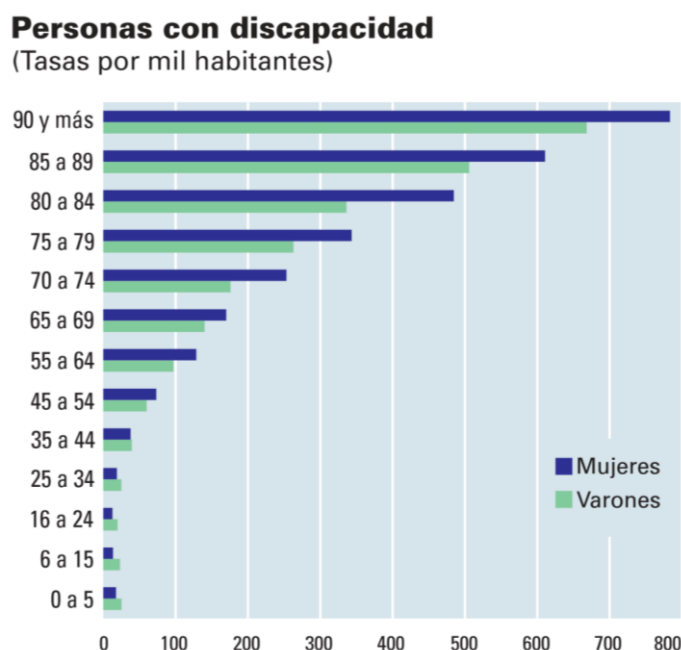


Imagen 1.1: Tasa de personas con discapacidad.

De todas las personas con discapacidad cada una necesitará unos cuidados o tratamientos específicos, en este gráfico podemos ver distintos de los tipos de cuidados que estas personas necesitan, y una comparación del 1999 con el 2008.

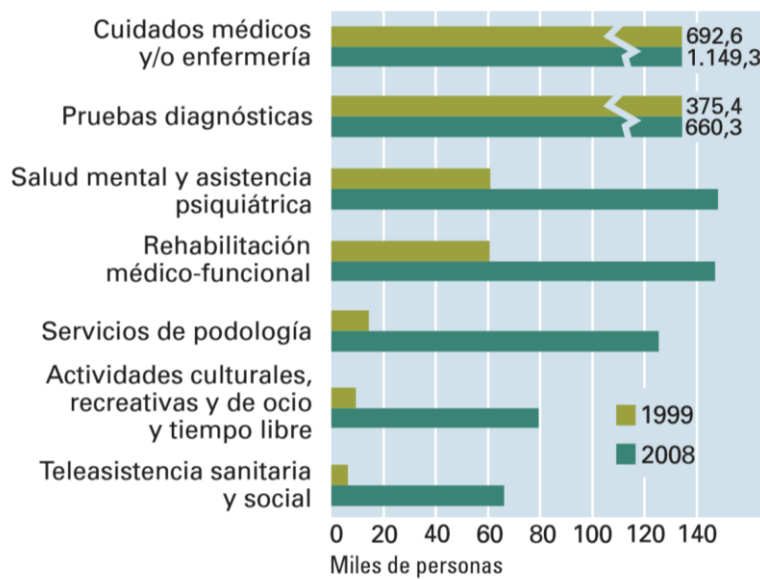


Imagen 1.2: *Distintos tipos de cuidados a personas con algún tipo de discapacidad.*

De todos estos tipos de cuidados, en el presente proyecto, nos centraremos en los cuidados de Rehabilitación Médico-Funcional. Concretamente en las personas que hayan sufrido un accidente cerebro-vascular, una lesión postraumática con afectación medular, o cualquier tipo de persona que por cualquier percance, tenga dificultades de movimiento en sus extremidades. Concretamente en las extremidades Superiores.

((INE) I. n., 2009)

1.2. Principales Causas de Minusvalía en las Extremidades Superiores.

La principal causa de algún tipo de minusvalía en las extremidades superiores, se debe a los accidentes cerebrovasculares, pudiendo estos por un lado, originar algún tipo de problemática en las extremidades si es grave, o siendo este más leve, no originar ningún tipo de problema a nivel sensitivo o motor en dichas partes del cuerpo humano. Los accidentes cerebrovasculares (ACV) constituyen un problema de salud mundial, los cuales tienen tendencia creciente.

Según datos de la Organización Mundial de la Salud (OMS), los ACV son unas de las causas más importantes de discapacidad, no sólo en las extremidades superiores, y afecta seriamente a la calidad de vida del individuo, siendo su espectro de afectaciones muy amplio. Así mismo, se asocia con problemas emocionales y depresión.

(Secretaría de Salud, 2009).

Las secuelas por ACV pueden ser sensitivas o motoras, siendo estas últimas las que generan un mayor grado de invalidez. Es por ello que el mayor número de pacientes que pueden requerir este tipo de rehabilitaciones, son lo que hayan sufrido un ACV. Pero existen diferentes causas que pueden originar algún tipo de minusvalía en las extremidades superiores, estas pueden ser, lesiones en la médula, bien sea por motivos genéticos, hereditarios, o por cualquier traumatismo/accidente que la persona haya podido sufrir, o por cualquier otro motivo que pueda llegar a derivar en pérdida de las facultades motoras y sensitivas de las extremidades superiores.

Por lo tanto centrándonos en la rehabilitación del paciente, en la actualidad, la mayoría de estas terapias se realizan de forma manual involucrando rutinas de movimientos en las que se requiere esfuerzo físico por parte del fisioterapeuta. En algunos tipos de terapia el fisioterapeuta debe aplicar una resistencia al movimiento del paciente, la fuerza aplicada debe ser controlada para evitar generar una lesión mayor, además si esta no es aplicada correctamente se puede provocar un temor en el paciente a las terapias y por ende una tensión de los músculos afectados, lo que con lleva a un retraso significativo en la evolución del tratamiento.

Puesto que los encargados de esta rehabilitación, serán los fisioterapeutas, más un equipo de especialistas detrás suya, encargados del seguimiento del paciente (Neurólogos, Traumatólogos, etc...), es entonces, cuando este proyecto nace de la necesidad de realizar terapias de movimiento pasivo/activas para la rehabilitación de ese número de personas que están recibiendo tratamientos de rehabilitación en el miembro superior de una manera controlada y repetitiva, en la que se pueda llevar un registro cronológico de la evolución del paciente.

Un buen tratamiento en la rehabilitación de personas con secuelas motoras como por ejemplo las personas con lesiones medulares con afectación a los movimientos de las extremidades superiores, o a personas que hayan sufrido cualquier percance del tipo que sea, que tengan severos problemas en los movimientos de dichas extremidades, implica que hay que realizar una gran labor de terapia experimental.

La adaptación constante de las técnicas de rehabilitación a la respuesta del paciente que se quiere lograr mediante la utilización de un dispositivo automático de rehabilitación motora, no solo evitará malgastar el tiempo en terapias ineficientes, sino que también hará posible un tratamiento sistemático con mejores resultados.

A modo de resumen, y como se puede apreciar a continuación, elaboramos una tabla en la que representaremos los principales motivos que pueden llegar a derivar en algún tipo de problemática (Minusvalía) en las extremidades Superiores.

Tabla 1.1: Principales motivos de minusvalía en los brazos.

Origen	Lesión
Cerebral	<ul style="list-style-type: none"> • Parálisis Cerebral. • Traumatismo Craneoencefálico. • Tumores.
Espinal	<ul style="list-style-type: none"> • Poliomieltis. • Espina bífida. • Lesiones medulares degenerativas. • Traumatismo medular.
Muscular	<ul style="list-style-type: none"> • Microbianas. • Malformaciones Congénitas. • Distrofias musculares.
Óseo-Articular	<ul style="list-style-type: none"> • Osteomielitis aguda. • Reumatismos Infantiles. • Lesiones osteo-articulares por desviación de la Raquis. (Cifosis, escoliosis, lordosis)

1.3. EXOESQUELETOS. ¿Qué es? ¿Para qué sirven?

Los exoesqueletos consisten en un mecanismo estructural externo acoplado a la persona y cuyos pares cinemáticos (juntas) y eslabones corresponden a las de la parte del cuerpo humano que emula. Es decir, están diseñados de tal manera que se adaptan a la morfología de las extremidades del cuerpo humano para su correcta funcionabilidad. Los exoesqueletos normalmente son diseñados para permitir la capacidad de movimiento en extremidades (piernas o brazos) o bien, aumentar la fuerza y resistencia a las personas con desordenes de movilidad. La principal característica de estas interfaces hombre-máquina, es que el contacto entre el usuario y el exoesqueleto permite transferir potencia mecánica y señales de información.

Así pues, este es un claro ejemplo de Biomimética, ya que con la forma de la naturaleza (Forma de las extremidades del cuerpo humano) se diseña un dispositivo, en este caso, con el fin de realizar una máquina de rehabilitación para las extremidades (Superiores e inferiores) de personas que sufran cualquier tipo de desorden o de minusvalía en estas.

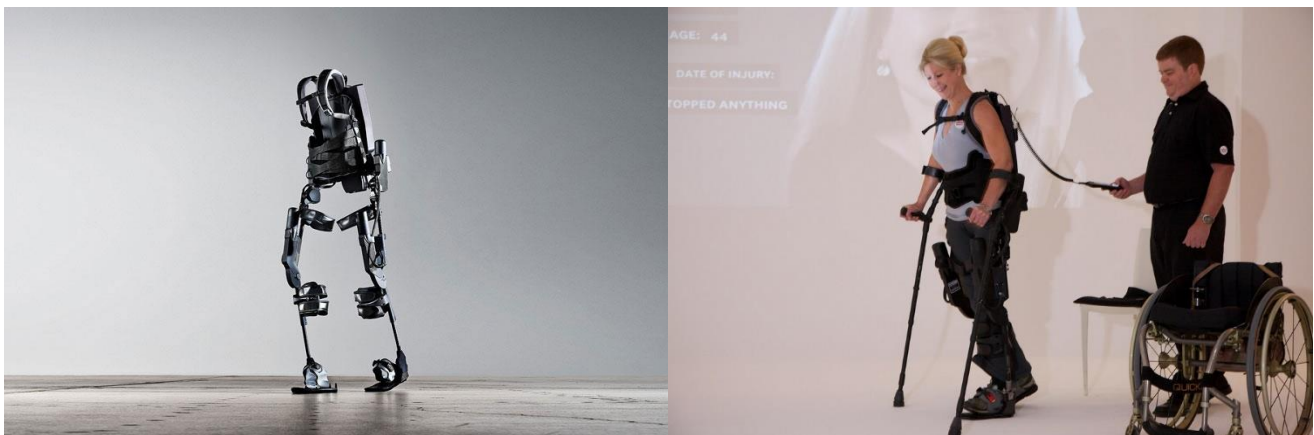


Imagen 1.3: Ejemplo del exoesqueleto de la empresa Ekso Bionics y paciente usando el mismo.

La utilización de exoesqueletos robóticos en terapias con enfermos de párkinson y personas que han sufrido un accidente cerebro vascular (ACV) o lesiones de médula aporta importantes avances a su rehabilitación y la recuperación de movilidad, según expertos. Así lo han asegurado investigadores del grupo de Bioingeniería del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) y del Hospital Nacional de Paraplégicos de Toledo, que han presentado sus proyectos de robótica de rehabilitación en la Real Academia de Ingeniería.

“La rehabilitación con neuroprótesis busca aplicar la ingeniería allí donde la medicina no llega y complementarla” Eduardo Rocon doctor en ingeniería industrial y miembro del grupo de Bioingeniería del CSIC.

Mediante la práctica y la repetición, los pacientes con lesiones en las piernas, en este caso, ejercitan el acto de andar, eso sí, con ayuda de un exoesqueleto y unas muletas. Pero es el entrenamiento más real que pueden tener, y sin lugar a dudas es muchísimo más gratificante el esfuerzo realizado por estos pacientes ya que, pese a la gran ayuda ejercida por este tipo de exoesqueletos, ellos ven que andan, recuerdan ese acto y están ejercitando de pie. Sin lugar a dudas es un método de rehabilitación muy gratificante y motivadora.

En la actualidad como bien se ha comentado anteriormente existen diferentes tipos de exoesqueletos para la rehabilitación de las extremidades inferiores, básicamente son estos los primeros en existir debido a que es muchísimo más fácil imitar los movimientos de las piernas que los movimientos de los brazos.

Básicamente lo que hace este tipo de exoesqueletos (Extremidades inferiores), es imitar el acto de andar de las personas, realmente lo consiguen con una fidelidad muy alta, y por supuesto también realizan otros movimientos básicos, como pueden ser, el acto de subir escaleras, o simplemente flexión extensión de piernas. Con ello consiguen que el paciente mediante esta ayuda realice movimientos tan cotidianos y reales como es el acto de andar.

2. OBJETIVOS DEL TFG Y ESPECIFICACIONES DEL SISTEMA A DISEÑAR.

El objetivo del presente proyecto es la realización de un dispositivo de rehabilitación, cuyo diseño e implementación se presenta en este documento. Es una estructura con la forma determinada para que se adapte desde el exterior a las extremidades del cuerpo humano donde se vaya a utilizar, en este caso a las extremidades superiores del cuerpo humano.

Como bien hemos comentado, si se adapta desde el exterior, se trata del desarrollo de un exoesqueleto, y dicho dispositivo se sujeta al brazo del paciente permitiéndole a este realizar movimientos combinados, gracias a los cinco grados de libertad (Tres en el hombro y dos en el codo) que posee el dispositivo de rehabilitación.

El tema a desarrollar en el proyecto, es un tema muy extenso, que abarca todos los campos de la Ingeniería, englobando de esta manera en el desarrollo de un dispositivo final a, Ingeniería Eléctrica, Electrónica, Informática, Telecomunicaciones, Mecánica e Ingeniería en Diseño Mecánico. Por lo tanto hay que dejar muy claro que en el presente proyecto se desarrolla una solución a nivel de diseño y desarrollo de un exoesqueleto para la rehabilitación de las extremidades superiores.

Antes de seguir con los puntos de los objetivos del proyecto y al mencionar el término exoesqueleto, es de vital importancia mencionar el significado de dicho término.

2.1. Ventajas del uso de Exoesqueletos en Pacientes.

La utilización en forma combinada del exoesqueleto robótico junto con las otras herramientas de la red permite:

1. Estudiar el movimiento humano relacionado con trastornos motores tales como el temblor patológico o la espasticidad, ya que proporciona información durante la realización de tareas motoras específicas y puede convertirse en una herramienta de diagnóstico y estimación para cuantificar disfunciones motoras.
2. Configurar estudios de control neuro-adaptativo con personas para el aprendizaje o entrenamiento de patrones de movimiento específicos mediante la aplicación de fuerzas pre-seleccionadas sobre el brazo. Esto constituye un método potencial para enseñar destrezas motoras y para neuro-rehabilitación de pacientes con lesiones cerebrales.
3. Validar modelos neurofisiológicos del control motor de miembro superior e inferior, que permitan una mejor comprensión de cómo se integra la información sensorial y de cómo ésta resulta en comandos motores a nivel cortical y muscular.
4. Estudiar cómo se comporta el cuerpo humano ante la aplicación de carga externa. Muchas ayudas técnicas para compensación funcional de la discapacidad se basan en la aplicación de cargas. Este estudio será por tanto de particular importancia para el futuro desarrollo de ayudas técnicas a la discapacidad.
5. Utilizar el exoesqueleto como una herramienta para explorar nuevos canales de comunicación en la interfaz hombre-robot.
6. Desarrollar un sistema de rehabilitación en el cual el paciente realice ejercicios de una forma más automatizada, en la cual combinando ejercicios terapeuta/exoesqueleto, este realice un tratamiento para su lesión más satisfactorio, tanto a nivel de resultados como a nivel de satisfacción personal.

7. Estimar y cuantificar parámetros del miembro superior tales como la impedancia mecánica. La identificación de esta impedancia en la realización de movimientos o bajo posturas específicas ha llegado a ser relevante para entender el modo de control de las articulaciones humanas, cómo el SNC genera las señales de control y cómo la ejecución del movimiento se mantiene bajo condiciones de carga variantes.

2.2. EXOESQUELETO; Extremidades Superiores.

Como bien hemos definido el término exoesqueleto, este proyecto va a tratar de la elaboración de un dispositivo mecánico que se adapte exteriormente a las extremidades superiores, se tiene que adaptar totalmente a los brazos, para realizar los ejercicios con mayor comodidad, ya que su principal intención es poder crear una herramienta útil, tanto para el terapeuta como para el paciente, en la tarea de rehabilitación.

Comentado en apartados anteriores, es un producto prácticamente inexistente en el mercado, si bien, sí que tiene antecedentes de exoesqueletos dedicados a las extremidades inferiores. Es cierto que se está investigando en la implantación de exoesqueletos para las extremidades superiores, y hay varios estudios en marcha para poder conseguir sacar un producto lo más fiel posible, cuyo objetivo, y centrándonos sólo en la aplicación médica, sería sacar al mercado un dispositivo para la rehabilitación de las extremidades superiores.

Como veremos en apartados siguientes, como por ejemplo en análisis de alternativas, y más concretamente en productos existentes, hay varios prototipos en marcha, de los cuales nos basaremos en la creación de nuestro propio dispositivo.

Antes de todo esto, veremos una serie de objetivos y restricciones que tiene que cumplir nuestro dispositivo, y en base a esos criterios basaremos nuestras futuras propuestas y desarrollo del diseño a lo largo de este documento (TFG).

El dispositivo es controlado por medio de una interfaz de usuario que permite enviar las órdenes de movimiento al exoesqueleto a partir del puerto del computador, por lo tanto el terapeuta puede modificar la terapia que debe realizar el paciente modificando las trayectorias a seguir por el exoesqueleto. Adicionalmente, podrá programar la cantidad de repeticiones que el paciente debe realizar y almacenar los datos obtenidos de la posición de cada una de las articulaciones del miembro superior en cada sesión de terapia, para de esta forma monitorear el progreso del paciente.

Por lo tanto la creación de este dispositivo, está destinado a ser una herramienta de ayuda para los profesionales que trabajen en el sector de rehabilitación en este caso los fisioterapeutas.

2.3. Componentes Básicos de un Exoesqueleto.

A modo de introducción citamos primeros los elementos principales en una tabla, para posteriormente describirlos más detalladamente, y así poder entender mejor este dispositivo que se realiza en este proyecto (TFG).

Tabla 2.1: Principales componentes de un exoesqueleto.

Componentes del Exoesqueleto
1. Marco.
2. Fuente de Alimentación/Baterías.
3. Sensores.
4. Controlador.
5. Actuadores.

Los exoesqueletos como los brazos mecánicos, o brazos industriales, constan de una serie de elementos clave, es por ello que tomamos como ejemplo este caso de la industria para aplicarlo a los elementos básicos de nuestro exoesqueleto.

- 1. Marco:** Usualmente hecho de materiales ligeros, el marco debe ser lo suficientemente fuerte para sostener el peso del cuerpo así como el peso del exoesqueleto y sus componentes. En nuestro caso al diseñar un exoesqueleto para las extremidades superiores no tendremos que tener en cuenta que una restricción que sea la de sostener el peso del propio cuerpo, ya que eso sería de carácter obligatorio para los exoesqueletos de las extremidades inferiores.

El marco usualmente tiene una serie de uniones las cuales coinciden con las uniones del cuerpo, en el hombro, codo y muñeca. Las siguientes uniones dentro de la muñeca y en la mano son un poco más complejas, por lo que nuestra intención inicial es desarrollar este elemento aparte y que se pueda acoplar al exoesqueleto.

2. **Fuente de Alimentación/Baterías:** Deben poder hacer funcionar el exoesqueleto la mayor parte del tiempo posible, o bien, ser fáciles de reemplazar. Las baterías deben ser ligeras y pequeñas para que el exoesqueleto no sea ni pesado ni voluminoso. Las baterías también deben ser de recarga rápida para que el exoesqueleto esté listo para el siguiente día. En nuestro caso no tendremos este problema, ya que se va a realizar un dispositivo fijo, cuya ubicación será una clínica especializada en rehabilitación, o cualquier gimnasio que se dedique al tratamiento de pacientes con problemas de movilidad. Por eso mismo y al tratarse de un dispositivo fijo, dicho sistema se alimentará de energía mediante la corriente eléctrica.
3. **Sensores:** Estos capturan la información sobre como el usuario desea moverse. Los sensores pueden ser manuales, como una palanca, o pueden ser eléctricos y detectar los impulsos fisiológicos generados por el cuerpo, o los sensores pueden estar combinados con dispositivos como un control remoto y un detector de movimiento que permite a quien lo usa cambiar el movimiento de por ejemplo, flexión-extensión del brazo, a movimientos de rotación, o movimientos de elevación y bajada del mismo. La información capturada por los sensores puede ser enviada a la computadora para ser analizada, y poder crear planes específicos de rehabilitación para cada paciente en concreto.
4. **Controlador:** Actúa como el cerebro del dispositivo, el controlador es una computadora a bordo la cual toma la información capturada por los sensores y controla a los actuadores.

La computadora coordina a los distintos actuadores en el exoesqueleto y permite al exoesqueleto y su usuario, parar el brazo en una posición específica y mantener posición, flexionar y extender, con más o menos resistencia (Para trabajar más o menos determinados músculos en función de lo que queramos fomentar) con mayor o menor rapidez, en fin realizar infinidad de movimientos en función de la lesión o en función del régimen/tratamiento de ejercicios que tenga el paciente.

5. **Actuadores:** Si el marco es como los huesos del cuerpo y el controlador el cerebro, entonces los actuadores son como los nervios, músculos y tendones que ejercen el movimiento. Los actuadores son usualmente motores eléctricos o hidráulicos. Usando la energía de las baterías o corriente eléctrica (dependiendo del diseño que escojamos) y la información enviada por la computadora, los actuadores mueven el exoesqueleto y la persona que lo usa.

2.4. Requisitos/Aspectos mínimos que debe cumplir la rehabilitación con Exoesqueleto.

Como en el apartado anterior, primero nombramos los aspectos mínimos que tiene que cumplir dicho dispositivo, para una vez nombrados estos, explicarlos detalladamente. Estas pautas nombradas a continuación, se tienen que cumplir estrictamente, ya que como va a ser una herramienta de apoyo para el proceso de rehabilitación, una norma imprescindible sería la ayuda a la recuperación de ciertas funciones de las zonas del cuerpo humano y no lo contrario.

Tabla 2.2: Aspectos mínimos a cumplir.

Requisitos/Aspectos mínimos de Rehabilitación con Exoesqueleto
1. Sustentación y Capacidad de movimiento.
2. Reducir el Riesgo de Lesiones.
3. Fuerza de Asistencia al movimiento.
4. Programación de Actividades a modo de Juego.
5. Sensores o Transmisores con registro de Actividad para registrar mejoría.

1. Proporcionar sustentación a las extremidades superiores del cuerpo, así como poder facilitarles la capacidad de movimiento (Activo/Pasivo).
2. Reducir el riesgo de lesiones, por medio de controlar o limitar el rango de movimiento, para evitar la hiper-extensión, o la sobrecarga de músculos “atrofiados” y articulaciones.
3. Proporcionar una fuerza de asistencia al movimiento, durante la realización del ejercicio. Dicha fuerza puede ser reducida con el paso del tiempo, para que el paciente realice el movimiento por sí solo, y más adelante dicha fuerza puede ser opuesta a la fuerza aplicada por el paciente para ejercitar los músculos del individuo en cuestión.
4. A modo de que el entrenamiento mediante exoesqueleto pueda ser una tarea más amena, los movimientos a realizar, pueden estar guardados en un ordenador y mostrarlos en una pantalla, para poder crear tareas de rehabilitación interactivas, haciendo así pues una especie de “juego”. (IDEA).
5. Disponer a lo largo de este exoesqueleto una serie de dispositivos que almacenen la información de posible mejora del paciente (Por ejemplo sensores que detecten la fuerza ejercida por el paciente, y ver con el transcurso del tiempo si esta fuerza va en aumento, señal de que algo marcha bien.).

2.4.1. Requisitos Mínimos de Seguridad.

Puesto que se va a realizar el diseño de un dispositivo para ser utilizado por personas, debe de cumplir unos requisitos mínimos de seguridad, ya que en todo momento se debe de garantizar la seguridad e integridad del usuario, y puesto que este dispositivo va a ser un exoesqueleto para la rehabilitación de las extremidades superiores, habrá que tener especial cuidado con los aspecto de seguridad.

Al tratarse de un dispositivo para la rehabilitación, los usuarios/pacientes que sean los usuarios finales de este, no presentan unas condiciones normales en cuanto a movilidad de la extremidad, sensibilidad (en algunos casos pueden presentar hipersensibilidad, lo que puede hacer que puedan sufrir daño en algún momento realizando un determinado ejercicio), atrofia muscular, rigidez de articulaciones, etcétera.

Es por eso que aparte de las condiciones básicas de seguridad que podemos tener en cuenta hay que añadir las que suponen que sea un dispositivo para la rehabilitación.

Los requisitos de seguridad que debe de cumplir el sistema son los siguientes:

1. El sistema de control debe conocer en todo momento las posiciones angulares de los acoplamientos tal que no se excedan de los rangos de movimiento humano. Además, debe usarse sensores redundantes (al menos dos por par cinemático) para asegurar una correcta lectura de las posiciones.
2. Los movimientos a realizar por el dispositivo no deben de ser bruscos, sino estar suavemente definidos de principio a fin, ya que si se realizan movimientos bruscos podemos llegar a ocasionar lesiones en el paciente.
3. Se deben colocar botones de apagado de emergencia que estén tanto al alcance del usuario como del fisioterapeuta o médico encargado. Este podría estar colocado en el suelo, para que el propio paciente pueda activarlo con el pie o el fisioterapeuta encargado de dicho paciente pueda activar dicho pulsador enseguida, y así desactivar la máquina.
4. Los elemento de sujeción de la extremidad humana a la extremidad robótica deben ser de un tejido suave, es decir la pieza que sujete el brazo al brazo del exoesqueleto debe de estar recubierta de un tejido agradable al tacto, como por ejemplo estar recubierto de una espumilla.
5. El aparato debe poder retirarse del usuario con facilidad, para lo cual no debe estar sujeto rígidamente sino con correas u otros elementos con cierta elasticidad.
6. Ninguna pieza que este en contacto directo con el usuario, o que pueda llegar a estar en contacto con el usuario debe de tener el canto vivo, todas estas piezas tendrán un canto redondeado, para evitar que durante el uso del sistema se pueda dejar marcas en el usuario, o incluso poder llegar a lastimarlo.
7. El dispositivo debe de ser capaz de fijar una posición para que el usuario se coloque y se retire del exoesqueleto.

2.5. Objetivos y Restricciones del Dispositivo.

Los objetivos a desarrollar en este proyecto son varios, en este apartado se detallan los objetivos que corresponderían al desarrollo de un proyecto completo de Diseño y Desarrollo y Fabricación de un Exoesqueleto para la rehabilitación de las Extremidades Superiores. Este hecho supone de disponer de un equipo multidisciplinar de Profesionales, este equipo debería estar formado de:

1. **Médicos y Fisioterapeutas:** Encargados de dar las pautas a el equipo de Ingenieros, en el ámbito de movimientos a realizar, aportación de información del tipo señales electromiográficas (ya que cada movimiento del cuerpo humano tiene una determinada intensidad, frecuencia, etcétera, registrable mediante aparatos de adquisición de información electromiográfica), y serían los que finalmente dieran validez al diseño, ya que ellos aparte de ser los profesionales encargados del seguimiento y desarrollo de la terapia del paciente, saben en profundidad si los movimientos que realiza la máquina pueden aportar aspectos positivos en la rehabilitación.
2. **Ingenieros Eléctricos y Electrónicos:** Encargados del desarrollo del circuito eléctrico y electrónico de todo el dispositivo a realizar. Diseño de circuitos para poder medir, posición, pares cinemáticos, resistencia ejercida, etcétera.
3. **Ingenieros Informáticos y Telecomunicación:** Encargados del desarrollo de la comunicación Exoesqueleto-Computadora, aparte de desarrollar una base de datos/Software que compile toda la información recibida por parte del personal médico, en cuanto a datos obtenidos de la información electromiográfica, para poder realizar los movimientos del exoesqueleto correctamente. Es decir, este grupo de profesionales se encargaría del desarrollo de la comunicación entre la máquina y el ordenador, y de desarrollar un Software de control de movimientos de este.

4. **Ingenieros Mecánicos:** Encargados del desarrollo de la parte mecánica del sistema, en lo que se refiere a cálculos cinemáticos, elección de servomotores adecuados, tipos de lubricación en zonas articuladas, etcétera.
5. **Ingenieros en Diseño Mecánico:** Encargados del diseño íntegro del dispositivo, deben de conocer exactamente que movimientos se quieren realizar con el Exoesqueleto para poder desarrollar un dispositivo que sea capaz de realizar dichas tareas sin problema alguno. Junto con los Ingenieros mecánicos se encargarían de la parte mecánica del dispositivo, además este grupo de Ingenieros les sirve de apoyo a todos los demás grupos que formarían este equipo multidisciplinar, aportando soluciones a sus problemas mediante el diseño.

Por lo tanto en el desarrollo de este proyecto correspondiente a la titulación de Grado en Ingeniería en Diseño Mecánico se abraza la problemática del diseño de un Exoesqueleto funcional que llegue a ser válido para la rehabilitación de las extremidades superiores en personas que así lo requieran, es decir el objetivo principal de este proyecto es diseñar algo que resuelva una problema.

Para llegar a lograr esto tenemos unos objetivos específicos, como son los que a continuación se detallan:

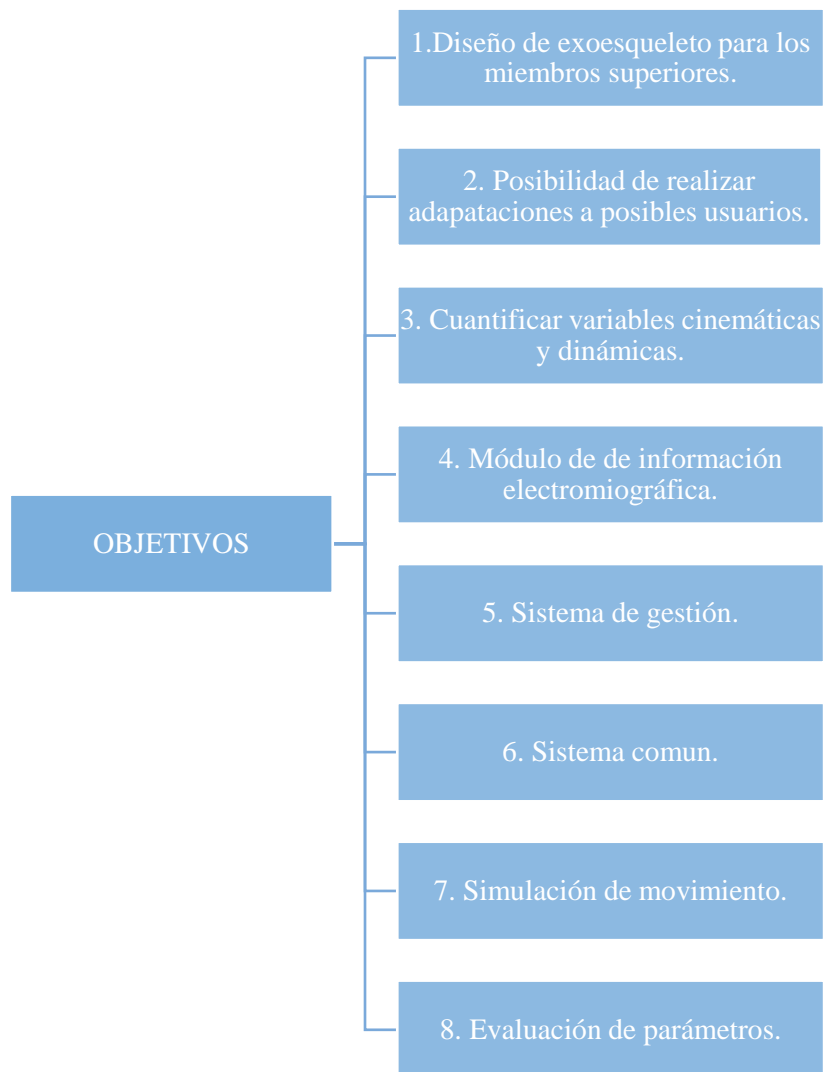
1. Diseño de un Exoesqueleto funcional para la rehabilitación de las extremidades superiores.
2. Estudio de dimensiones anatómicas, para un correcto diseño de la estructura final.
3. Dispositivo adaptable (en cierta medida) a distintos tipos de usuarios.
4. Funcionabilidad del dispositivo con varios grados de libertad. Como dato el brazo humano posee 7 grados de libertad independientes, en este dispositivo se consigue lograr 5 grados de libertad.
5. Diseño ergonómico.
6. Desarrollo de piezas que no causen posibles daños en el usuario final.
7. Elección de materiales correctos en el desarrollo de las piezas. Dichos materiales deberán de ser ligeros, para que la estructura del exoesqueleto no sea pesada.

Una vez comentados los objetivos específicos que deben realizarse en este proyecto, se enumeran los objetivos a nivel global que debería tener un proyecto completo en la realización final de este dispositivo, contado con todo el equipo de profesionales comentados anteriormente:

1. El desarrollo de un sistema robótico en forma de exoesqueleto destinado al miembro superior, capaz de aplicar fuerzas sobre las articulaciones y segmentos el miembro superior.
2. El desarrollo de un sistema de medida que permita cuantificar las variables cinemáticas y dinámicas asociadas al movimiento del miembro superior.
3. Desarrollo e implementación de algoritmos de control para controlar el dispositivo robótico, particularmente para la aplicación de diversos perfiles de fuerza.
4. El desarrollo de un módulo de adquisición de información electromiográfica (EMG).
5. Desarrollo de un sistema de gestión en forma de aplicación informática que permita controlar la ejecución del exoesqueleto robótico y que permita adquirir las variables desde los sensores.
6. Integración del sistema bajo una red o arquitectura común.
7. Definición y realización de experimentos para la evaluación y validación del sistema. Este objetivo conlleva la definición de un protocolo de medida para evaluar el sistema con usuarios.
8. Simulación y definición de índices de comparación para cuantificar las variables. Simulación de las técnicas de procesamiento de la información.

9. Evaluación de la relación entre parámetros de impedancia mecánica (concretamente viscosidad y rigidez) del codo con información electromiográfica, usando una serie de funciones matemáticas lineales derivadas. Validación de esta relación con los datos experimentales.

A modo de resumen podemos ver los objetivos del proyecto completo en el siguiente esquema:



2.5.1. Fuerzas de Interacción.

Como fuerzas de interacción se consideran las fuerzas y o pares resultantes de la acción de un cuerpo sobre otro. En el caso de la robótica médica, se suele hablar de fuerzas de interacción del robot sobre el paciente. Es imposible que estas fuerzas sean nulas, ya que es necesaria la acción del robot sobre el paciente; tampoco se puede decir que las fuerzas de interacción son dañinas o perjudiciales, ya que muchas veces se requieren para ejecutar el movimiento terapéutico. Sin embargo, es importante controlar la transmisión de fuerzas de movimiento terapéutico. Sin embargo, es importante controlar la transmisión de fuerzas del robot al usuario, ya que hay una barrera en la que estas fuerzas pasan a ser perjudiciales y pueden ocasionar rechazo a la terapia, dolor e incluso lastimar al paciente.

En el caso de los pacientes con ACV, los cuales pueden sufrir rigidez, paresia y/o parálisis, se requiere una terapia en la cual el dispositivo robótico ejerza una cierta fuerza para recuperar los movimientos y la tonicidad muscular; pero por otro lado pueden sufrir hipersensibilidad, espasticidad y/o dolor, lo que puede jugar en contra de la terapia si se ejerce mucha presión sobre los miembros afectados. Cualquier incomodidad y/o dolor puede afectar el objetivo de promover la neuroplasticidad cerebral.

Cuando se utilizan exoesqueletos robotizados, se debe tener especial cuidado con la alineación de los centros de rotación de las articulaciones mecánicas con sus homólogas biológicas. Puesto que las ortésis sujetan a la extremidad en diferentes puntos e imponen restricciones a su movimientos, si se produce un desalineamiento repercutirá en un aumento de las fuerzas de interacción sobre la extremidad, siendo éstas inadecuadas en el normal desarrollo de la terapia al aparecer componentes que no favorecen el movimiento, sino que producen esfuerzos musculares indeseado, produciendo dolor, rechazo y/o daños sobre el paciente. Las principales causas de Desalineamiento entre ortésis-extremidad son:

1. La diferencia entre arquitectura y forma de actuación de la ortésis frente a la anatomía humana, debido al uso de modelos simplificados de las articulaciones mecánicas. Las articulaciones biológicas no giran en torno a un punto fijo, sino que migran durante el movimiento, es decir sufren una rototraslación.

2. Debido a la alta variabilidad antropométrica de los pacientes, los exoesqueletos deben ser diseñados para ajustarse según las medidas del paciente. Si bien se crean sistemas capaces de ajustarse en un cierto rango, el hecho de que sea ajustable no garantiza una correcta alineación, ya que estos cambios son a paso fijo y dependen de las mediciones iniciales que se hagan al paciente.
3. Desalineamiento de la ortésis durante el movimiento terapéutico. Esto ocurre por dos motivos, debido al movimiento de los tejidos blandos que ocasionan un desplazamiento relativo de las sujeciones sobre el paciente y a movimientos del paciente durante el ejercicio, como un reacomodamiento del cuerpo o un cambio de posicionamiento.

Todos estos factores sumados generan un desalineamiento variable entre las articulaciones del robot y las del paciente, produciéndose una transmisión inadecuada de fuerzas sobre el paciente. Estos problemas se pueden producir en todas las articulaciones del complejo articular superior e inferior, por lo que es necesario un diseño mecánico que permita minimizar los desalineamientos. Algunas investigaciones han tomado en cuenta parte de esta problemática y han tratado de diseñar exoesqueletos más ergonómicos, otros sólo procuran tratar de alinear los ejes de rotación.

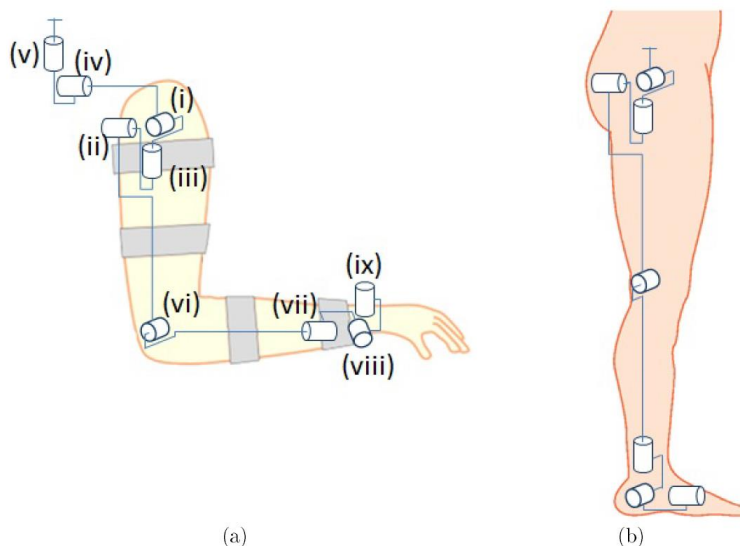


Imagen 2.1: Cadena de las extremidades Superior e Inferior. A) Extremidad superior. b) Extremidad inferior.

2.6. Diagrama esquemático del sistema (Maquina-computadora).

Puesto que el dispositivo del exoesqueleto debe de tener un sistema de control y comunicación es necesario explicar un poco por encima dicho sistema de funcionamiento para poder hacernos una idea principal de funcionamiento.

Básicamente el esquema que se muestra a continuación consiste en un diagrama simplificado del modo de funcionamiento que tendremos en el exoesqueleto. Primero el exoesqueleto mediante un módulo de información electromiográfica irá conectado a una unidad de control, en la cual podremos encontrar distintos controladores como drivers (In/Out, entrada y salida de información hacia el exoesqueleto o hacia el ordenador), una serie de aplicaciones para facilitar la comunicación y control del dispositivo, y una unidad de control Kernel, que funciona como hilo conductor de toda esta información trasferida.

Una vez se procesa la información en la unidad de control, esta es enviada a una unidad PC, en la cual se puede ver la información recibida y donde se procesará toda la información tanto enviada como recibida.

Como se puede observar este diagrama tiene un doble sentido es decir, uno de los caminos lógicos es que la unidad PC tenga el software necesario para ejecutar los determinados movimientos, esta información es transmitida directamente a la unidad de control, donde se traduce dicha información y seguidamente esta es trasmitida al exoesqueleto para que ejecute dichos movimientos.

O completamente en sentido inverso, como el caso explicado al principio, es decir, el exoesqueleto está realizando ciertos movimientos, dichos movimientos estarán medidos por una serie de sensores, que pueden medir, posición, fuerza, entre otros, esta información es transmitida a la unidad de control donde se traduce y es enviada a la unidad PC, para que en tiempo real analice los datos recibidos y ajuste automáticamente el programa a realizar en el exoesqueleto.

En la imagen inferior podemos ver un ejemplo del diagrama explicado.

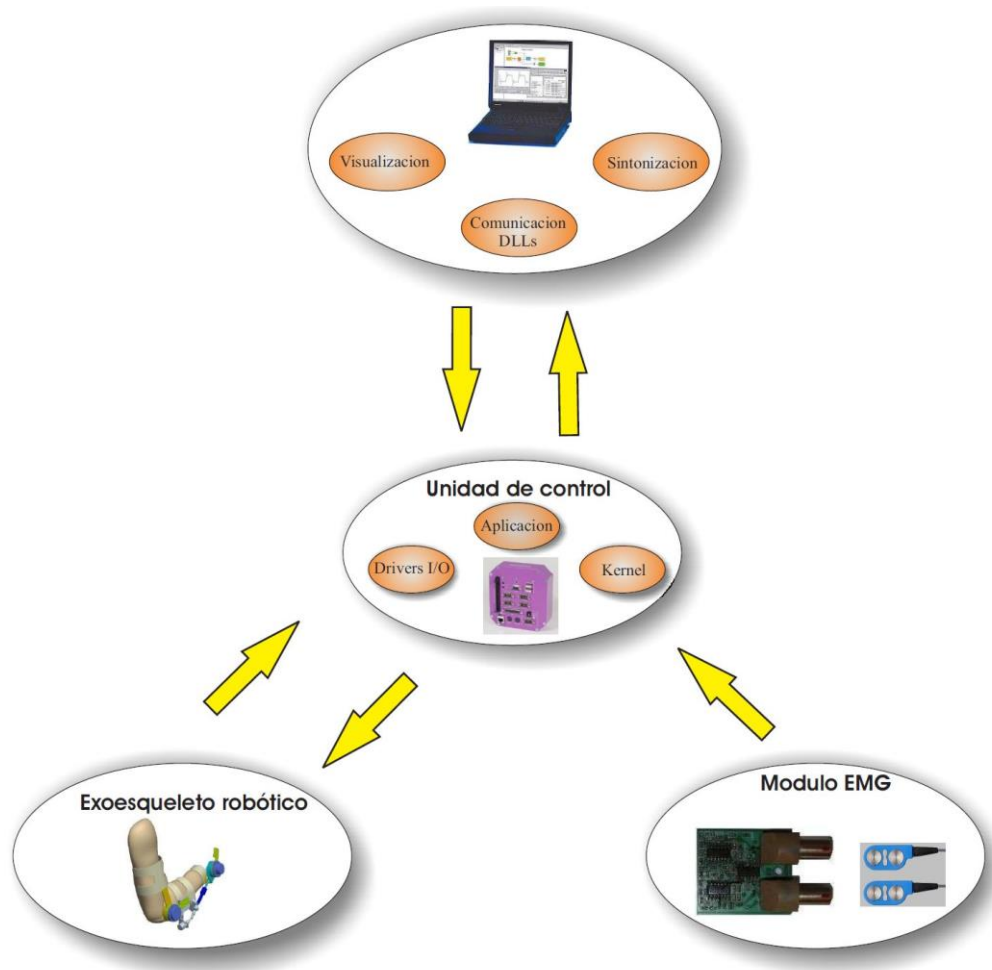


Imagen 2.2: Diagrama de Control del Dispositivo del Exoesqueleto.

3. ESTADO DEL ARTE.

Una vez definidos claramente los objetivos y especificaciones a desarrollar en este proyecto, vamos a centrar más el tema y a explicar varios conceptos como pueden ser lo que se detallan en los siguientes subapartados. Para posteriormente realizar un análisis de estado del arte de los exoesqueletos más importantes actualmente, y que se encuentran en fase de desarrollo.

3.1. Ingeniería de Rehabilitación.

La Ingeniería de rehabilitación es el uso de la ciencia y los principios de la ingeniería para; **1)** Desarrollar soluciones y dispositivos tecnológicos para asistir a las personas con discapacidades, y **2)** para ayudar a la recuperación de las funciones físicas y cognitivas perdidas debido a una enfermedad, un accidente o una lesión.

Los ingenieros de rehabilitación desempeñan y construyen dispositivos y sistemas para satisfacer un amplio rango de necesidades que puedan asistir a las personas con su movilidad, comunicación, audición, visión y cognición. Estas herramientas ayudan a las personas con sus actividades y tareas cotidianas relacionadas con el trabajo, la vida independiente y la educación.

La Ingeniería de rehabilitación puede incluir observaciones relativamente simples por ejemplo, cómo los trabajadores ejecutan tareas, y luego hacer adaptaciones, para posteriormente, eliminar lesiones y molestias futuras. En el otro extremo del espectro, la ingeniería de rehabilitación más compleja, por ejemplo consiste en el diseño de interfaces sofisticadas Cerebro-Computadora, que permiten que una persona con discapacidad severa pueda operar computadoras y otros dispositivos de asistencia con sólo pensar en la tarea que desea realizar.



Imagen 3.1: Una persona escribe frases con sus pensamientos utilizando un sistema de interfaz cerebro-computador.

Los ingenieros de rehabilitación también desarrollan y mejoran métodos de rehabilitación para recuperar funciones en pacientes que hayan sufrido diversos accidentes, por ejemplo pérdida de movilidad de las extremidades (piernas o brazos). Estos pacientes solían ser tratados mediante procesos de rehabilitación y Neurorrehabilitación, pero desde hace unos años este proceso está siendo complementado mediante la implantación de la “robótica en la rehabilitación” o “Rehabilitación con neuroprótesis”.

La Neurorrehabilitación es un proceso clínico dirigido a restituir, minimizar y/o compensar las alteraciones funcionales y/o cognitivas que aparecen tras una lesión en el sistema nervioso. Las intervenciones en Neurorrehabilitación son altamente complejas dada la dificultad intrínseca en el manejo clínico del sistema nervioso.

La investigación en tecnologías biomédicas es esencial para la provisión futura de los servicios de Neurorrehabilitación al facilitar la personalización de las intervenciones, modular la intensidad y duración de los programas, monitorizar en tiempo real y diferido, permitir un seguimiento más cercano, incluso en el propio hogar, y obtener conocimiento derivado de la práctica clínica y su estructuración.

De forma tradicional, la Neurorrehabilitación suele ser suministrada por terapeutas profesionales, incluyendo terapia física y ocupacional. Este proceso lleva mucho tiempo, en donde el paciente aprende todos los días y realiza movimientos intensivos durante muchas semanas.

Estudios realizados presentan evidencia científica de que la Neurorrehabilitación es un objetivo lógico para la automatización, debido a la naturaleza repetitiva de las tareas y la naturaleza mecánica, además el avance en la recuperación del paciente está vinculado con la cantidad de repeticiones que realice en su terapia. Un terapeuta robot puede evaluar cuantitativamente el avance, adaptando la terapia al paciente, permitiendo una planeación congruente de un programa de terapia.

La rehabilitación robótica la definimos como el campo multidisciplinario dedicado a la rehabilitación de personas con discapacidades a un nivel aceptable en salud física, mental y a la interacción social y su entorno mediante la robótica aplicada, tecnologías emergentes y áreas de la salud.

El concepto de la rehabilitación robótica incluye una gran cantidad de dispositivos mecánicos, desde extremidades artificiales hasta robots para apoyar terapias de rehabilitación o para proveer asistencia personal en hospitales o en residencias

En la siguiente imagen podemos ver los diferentes campos de aplicación de la Rehabilitación robótica.



Imagen 3.2: *Diferentes campos de Rehabilitación Robótica.*

La rehabilitación robótica, además del uso de dispositivos robóticos, también es un concepto de diseño, análisis, construcción y desarrollo de dispositivos automatizados para asistir y ayudar a que las personas discapacitadas se integren a las actividades de la vida cotidiana a pesar de las consecuencias y efectos de la discapacidad. Así, este concepto requiere de comprensión de las ciencias médicas, de la rehabilitación y de la ingeniería.

Las ciencias médicas y la rehabilitación se encargan del análisis del movimiento neuromuscular, motor y los procesos de neurorrecuperación (terapia) y la ingeniería del diseño y control de las interfaces hombre-máquina, que sean ergonómicas y útiles para estimular con seguridad al paciente durante una sesión de terapia.

El análisis de movilidad de la extremidad es de gran importancia para el diseño de dispositivos robóticos, y es por esto que, tratamos la rehabilitación robótica como un concepto de diseño, la cual permite la descripción de la movilidad humana para fines terapéuticos a través de los conceptos y paradigmas de robótica. El uso de la robótica para la representación de modelos humanos permite de una manera simplificada conocer la movilidad articular de la extremidad a través de modelos cinemáticos.

Con la representación cinemática es posible proponer modelos del dispositivo a diseñar, de tal manera, que sean capaces de proveer la movilidad natural de la extremidad.

En los últimos años, la rehabilitación robótica se ha utilizado con gran aceptación por la comunidad en rehabilitación. La interacción entre humano-robot ha dado buenos resultados en la rehabilitación, con un nuevo enfoque de rehabilitación en comparación los métodos terapéuticos clásicos.

Dicho de esta manera puede resultar algo muy futurista, pero de hecho es una realidad, en la actualidad existen múltiples centros en todo el mundo en los que por ejemplo utilizan exoesqueletos para las extremidades inferiores con el objetivo de reaprender, de reeducar a los pacientes lo que es el acto de andar. En concreto en España hay 5.

3.2. Contextualización y análisis.

En esta sección se estudiará la interacción persona-robot. Además se presenta el estado del arte de los dispositivos robóticos desarrollados, enfocándose en la rehabilitación del miembro superior por medio de exoesqueletos. Se analizan los Grados de libertad (GdL) de cada diseño y cómo se ajustan sus centros de rotación con los ejes de las articulaciones biológicas.

Hay gran variedad de dispositivos robóticos, aunque básicamente se pueden dividir en aquellos que emulan la acción de un terapeuta y los exoesqueletos robotizados. Los primeros (Exoesqueletos que emulan a un terapeuta) mantienen la sujeción del paciente en un punto, por lo que las articulaciones del robot no coinciden con las del paciente, mientras que los exoesqueletos robotizados poseen una estructura mecánica que se asemeja a la de la extremidad humana, coincidiendo los ejes de rotación de ambos. Las líneas de investigación actuales se enfocan al desarrollo de exoesqueletos robotizados debido a que permiten un control posicional de las articulaciones y de los pares aplicados sobre ellas.

Dadas las características clínicas de los pacientes con ACV, o los pacientes con algún tipo de lesión medular, estas dos condiciones son importantes para tratar la espasticidad, la rigidez articular, la fuerza muscular, la movilidad articular y la neuroplasticidad.

A continuación se presenta un estado del arte (Estudio) enfocado a exoesqueletos robotizados de la extremidad superior poniendo énfasis en el diseño articular, no obstante antes de ello comentaremos las fuerzas de interacción, y se hará una breve mención a los exoesqueletos de las extremidades inferiores.

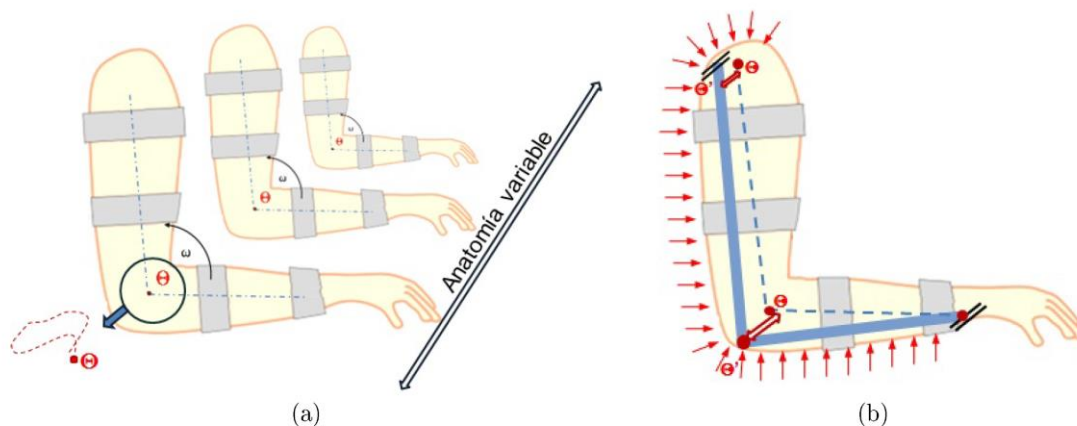


Imagen 3.3: a) desajuste entre articulaciones mecánicas-biológicas referidas a la anatomía del paciente, debido a la migración del centro de rotación y a la variabilidad antropomórfica.
 b) Desalineamiento y transmisión inadecuada de fuerzas a la extremidad.

3.4 Extremidad Superior.

El complejo de la extremidad superior está formado por las articulaciones del hombro (3 GdL), codo (1 GdL), y muñeca (3GdL), que pueden representarse con el modelo cinemático que veremos a continuación. La mayoría de los diseños de dispositivos robóticos se basan en articulaciones inspiradas en el modelo biológico, que se comportan como una bisagra para las articulaciones de 1 (GdL), o como una rótula para los que tienen 3 (GdL). Sin embargo estos modelos no consideran la complejidad de las articulaciones biológicas, las cuales pueden poseer más grados de libertad que las modeladas, que combinan movimientos de roto-translación causando una variación del centro instantáneo de rotación (CIR), según el movimiento y la fuerza efectuada.

A la hora de diseñar un exoesqueleto para la extremidad superior, es necesario considerar al menos la articulación del hombro y el codo, ya que ambas están íntimamente relacionadas. Esto quiere decir que un exoesqueleto del miembro superior debe tener al menos 4 grados de libertad siendo el más completo que considera del codo y el hombro, la muñeca, el antebrazo (y su movimiento de pronosupinación) y el cinturón escapular del hombro, con lo que los grados de libertad del robot se elevan a 9.

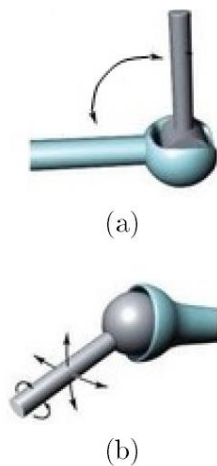


Imagen 3.4: Modelos mecánicos de articulaciones Humanas. (a) Modelo de bisagra. (b) Modelo de rótula.

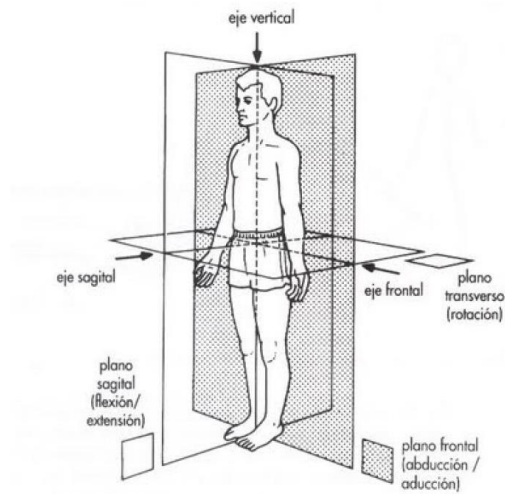


Imagen 3.5: Planos del cuerpo humano.

Por lo tanto llegados a este punto damos a paso a comentar los diferentes tipos de exoesqueletos de las Extremidades Superiores, de los cuales como se puede observar, muchos corresponden a prototipos en fase experimental, o proyectos por desarrollar, ya que se trata de un producto que está en fase de análisis, y no se ha extendido su comercialización como por ejemplos los exoesqueletos de las extremidades Inferiores.

3.4.1 Exoesqueleto Sueful-7.

Los movimientos articulares son la base de que se ha utilizado en la modelización de las articulaciones mecánicas para los exoesqueletos robotizados. Así, en la universidad de Saga en Japón, se está desarrollando el exoesqueleto “**SUEFUL-7**” Cuenta con 7 GdL, 3 GdL para la flexo-extensión, abducción-aducción y rotación interna-externa del hombro, 1 para ola flexo-extensión del codo, 1 para la prono-supinación del antebrazo y 2 para la muñeca.

Este robot posee 16 sensores electromiográficos ubicados en los músculos del hombro, codo y antebrazo además de dos sensores de fuerza (en el antebrazo y en la muñeca), que permiten conocer la intención del movimiento del paciente. Para compensar el desplazamiento del centro de rotación del hombro durante los movimientos de flexión-extensión y abducción-aducción, cuenta con un mecanismo de ajuste pasivo en el hombro, que hace variar su centro de rotación. En el plano sagital se utiliza un sistema deslizante capaz de compensar en 67 mm en movimiento del CIR del hombro. En el plano frontal, otro sistema deslizante compensa una variación del CIR de hasta 84mm. Este sistema busca que el exoesqueleto se acomode a los movimientos de elevación-depresión y retro-antepulsión del hombro, sin embargo, esta compensación está sujeta a las restricciones mecánicas que impone la geometría del mecanismo diseñado, por lo que no es del todo efectivo.

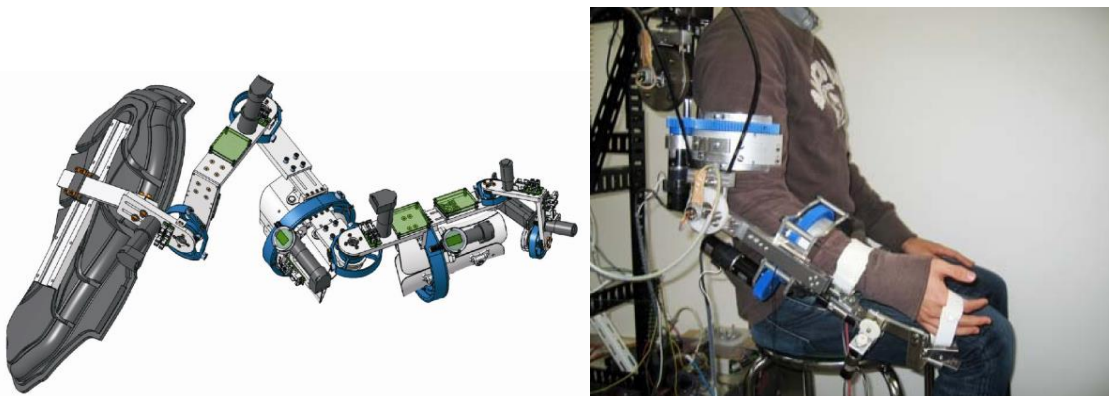


Imagen 3.6: Exoesqueleto Sueful-7.

3.4.2 Exoesqueleto WREX.

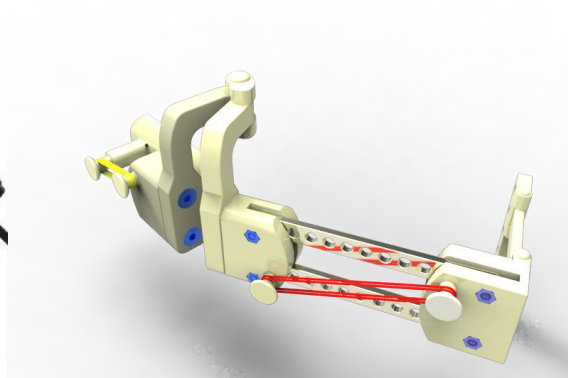
En el hospital de niños de Wilmington, USA, se desarrolló el “**WREX**” (Wilmington Robotic Exoskeleton), un exoesqueleto robótico pasivo de 4 GdL, en flexo-extensión, abducción-aducción del hombro y 2 GdL para la flexo-extensión del codo (posee una articulación adicional en el codo para compensar la ausencia de la rotación de éste). A través de bandas elásticas se compensa el peso del brazo y provee una sensación de suspensión de la extremidad superior.

El WREX está diseñado para niños con discapacidades neuromusculares y se puede acoplar a cualquier silla de ruedas así como a un soporte ubicado en la espalda lo que permite ser portable. Actualmente está siendo comercializado por JAECO ORTHOPEDIC y se ha logrado que niños con debilidades musculares pero con la mano funcional sean capaces de comer por si solos así como efectuar tareas de manipulación.

Inicialmente, se utilizó un motor lineal para realizar la flexión del codo, sin embargo esto no dio buenos resultados debido a que el niño no podía mover su mano hasta la boca debido principalmente a que los chicos no tenían la suficiente fuerza en el hombro para realizar la rotación externa. Cuando el codo se flexionaba, el centro de rotación natural de éste se desalineaba respecto al centro de rotación de la articulación mecánica, lo que ocasionaba una incomodidad en el niño debido a las fuerzas excesivas aplicadas en su codo. Debido a estos problemas, se eligió un diseño en el cual la transmisión de fuerza se llevara a cabo en la articulación del hombro (hacia una base) y el exoesqueleto se fijara en el antebrazo, quedando libre el codo para ajustarse de acuerdo a sus requerimientos. Este exoesqueleto es de uso asistencial y no está diseñado para rehabilitación, por lo que puede dejar libre la articulación del codo y evitar así transmisiones inadecuadas de fuerzas al niño.



a)



b)

Imagen 3.7: a) WREX. b) Concepto de WREX en Solidworks.

En el mismo hospital, se desarrolló una terapia de rehabilitación para pacientes con graves alteraciones denominado T-WREX (*Therapy-Wilmington Robotic Exoskeleton*), el cual utiliza una ortésis que asiste al movimiento, sensores y un programa informático que simula actividades funcionales.

3.4.3 Exoesqueleto ARMEOSPRING®.

Se utiliza un exoesqueleto con 6 grados de libertad pasivos, el cual a través de bandas elásticas, sostiene el peso del brazo y permite asistir a su movimiento. Se adaptó el WREX para adultos, añadiéndose además sensores en cada articulación para permitir el estudio de los movimientos del brazo y un sensor en la mano que permite medir la acción de agarre. Posteriormente HOCOMA INC. comercializó el primer prototipo bajo el nombre de ARMEOSPRING®, cambiando las bandas elásticas por un sistema de resortes y añadiendo una interfaz avanzada de realidad virtual para motivar al paciente durante la ejecución de la terapia. Se apoya en una base móvil lo que permite trasladarse u ajustarse según el tamaño del paciente, además de poder ser usada en sillas de ruedas. La articulación del codo posee 3 grados de libertad pasivos que reemplazan la rotación natural de este, aunque estas tres articulaciones no rotan respecto a un mismo centro de rotación.

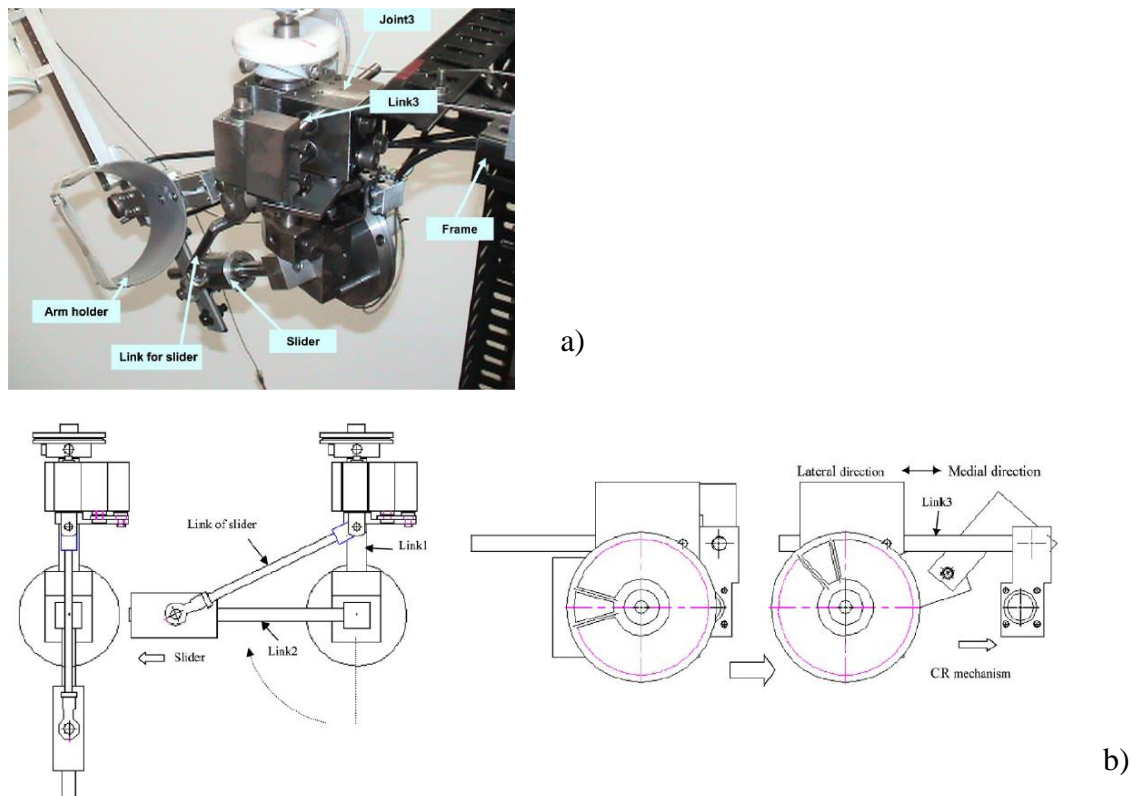


Imagen 3.8: Mecanismo de adaptación del centro de rotación para el hombro. a) Imagen real del prototipo ARMEOSPRING®. b) Esquema del mecanismo de funcionamiento de dicho prototipo.

3.4.4 Exoesqueleto ARMEOPOWER®.

En la ETH de Zurich (Escuela Politécnica Federal de Zurich), Suiza, se desarrolló un exoesqueleto para la terapia del miembro superior en pacientes con accidentes cerebro Vasculares, ARMIN, el cual va en su 3º versión. Posee 6 grados de libertad y en su sistema de control se basa en arquitecturas de impedancia y admitancia. Acompaña al sistema un programa en entorno visual que realiza una serie de juegos que ayudan a la rehabilitación del paciente. Actualmente, se encuentra en 5 centros hospitalarios para realizar pruebas terapéuticas y así evaluarlo. Para reducir las fuerzas de interacción en el hombro, en la versión II, se le añadió un grado de libertad pasivo lineal deslizante al hombro con el fin de compensar los deslizamientos verticales del hombro (depresión-elevación), sin embargo en la tercera versión se eliminó este grado de libertad extra y se sustituyó por una geometría que optimiza el movimiento de traslación y permite la rotación de los tres GdL del hombro entorno a un mismo punto. Basándose en este modelo, HOCOMA INC. desarrolló el ARMEOPOWER®, el cual es uno de los primeros exoesqueletos comerciales para la rehabilitación del miembro superior en personas afectadas con ACV.



a)



b)

Imagen 3.9: Exoesqueletos a) ARMIN en Zurich. b) ARMEOPOWER®.

3.4.5 Exoesqueleto HAL.

Otro producto comercializado por la empresa CYRBERDYNE SYSTEMS se desarrolló en la Universidad Tsukuba, Japón, el cual es un traje de robot denominado HAL (*Hybrid Assistive Limb*). Actualmente se comercializa la versión 5 de este modelo. Está diseñado para asistir el movimiento de todo el cuerpo en personas con trastornos musculares, o problemas de parálisis producidas por lesión cerebral o medular, aunque también puede ser utilizado como sistema de rehabilitación en pacientes con ACV e incluso de aumentación de fuerza y resistencia de una persona. Pesa en torno a los 23 Kg (soportados por el mismo traje) y tiene una autonomía aproximada de 2 horas y 40 minutos. Sus articulaciones rotan respecto a ejes de rotación fijos, por lo que no considera los posibles desalineamientos entre el traje y la persona.

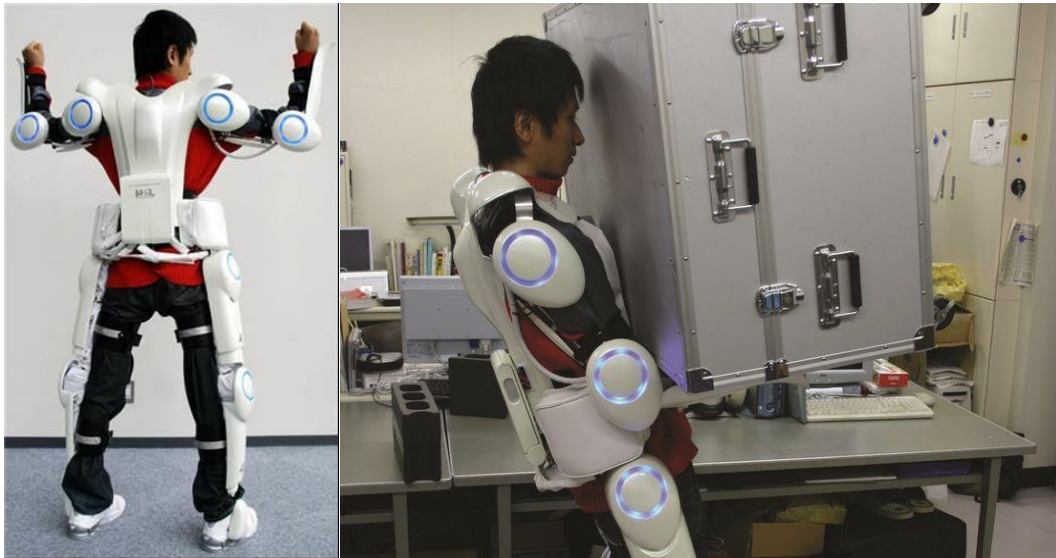


Imagen 3.10: Exoesqueleto HAL.

3.4.6 Exoesqueleto RUPERT.

En la universidad el Estado de Arizona se desarrolló el Rupert IV (*Robotic Upper Extremity Repetitive Trainer*). Diseñado para asistir en tareas repetitivas de la vida diaria, ya que es portable y tiene un bajo peso. Posee 5 grados de libertad, 2 en el hombro (Flexo-extensión y rotación interna-externa), 1 en el codo (flexo-extensión), 1 en la pronosupinación del antebrazo y 1 en el movimiento de flexo-extensión de la muñeca. Está actuado por músculos neumáticos y su estructura está construida por materiales compuestos de grafito. El objetivo de usar músculos neumáticos, es su bajo peso, lo cual es una prioridad dado que el exoesqueleto es portable.

Sin embargo los actuadores neumáticos son no lineales y difíciles de programar, por lo que las líneas actuales de investigación han preferido utilizar actuadores mecánicos, ya que se requiere un control preciso del movimiento.



Imagen 3.11: Exoesqueleto RUPERT, con músculos neumáticos.

3.4.7 Exoesqueleto ABLE.

En el CEA-LIST, *Service de Robotique Interactive*, en Francia, se desarrolló el exoesqueleto ABLE™ que cuenta con 4 grados de libertad, 3 para el hombro (flexo-extensión, abducción-aducción, rotación interna-externa) y uno para el codo (Flexo-extensión). Ahora se está comercializando por la empresa HAPTIO S.A., la cual ha modernizado el diseño y ha ampliado hasta 7 GdL la cadena articular del exoesqueleto, sin embargo todos los actuadores rotan en torno a un centro fijo. El exoesqueleto está soportado por una base fija de tal forma que su peso de 13Kg no lo absorba la persona y se puede utilizar para rehabilitación de personas con debilidad muscular. La transmisión del movimiento se realiza a través del sistema SCS (Screw Cable System), cuyas principales ventajas son la baja fricción y su alta capacidad de carga. Es capaz de generar un par de 13 Nm para el codo y de 18 Nm para el hombro.

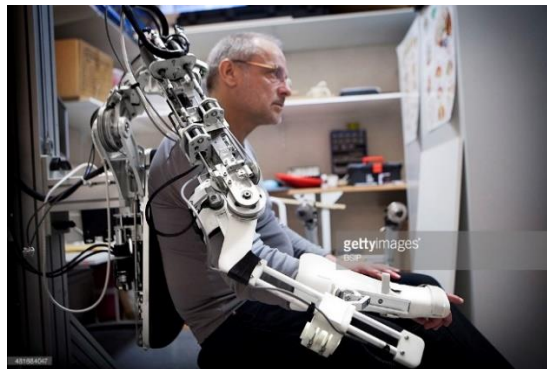
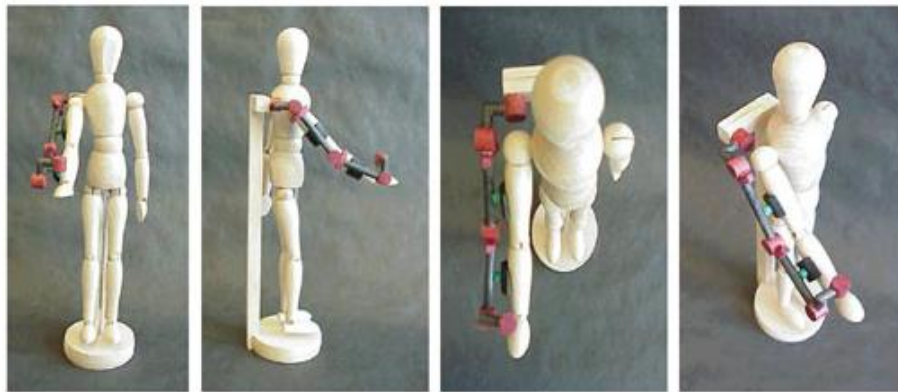


Imagen 3.12: Exoesqueleto ABLE.

3.4.8 Exoesqueleto EXO-UL7.

En la Universidad de Washington, en Estados Unidos, se desarrolla un exoesqueleto de 7 GdL para rehabilitar pacientes que hayan sufrido un ACV (EXO-UL7). Es controlado a través de un modelo del músculo humano que “predice” el movimiento a efectuar en tiempo real gracias a sensores electromiográficos ubicados en partes específicas del brazo. Pesa cerca de 10Kg y está soportado por una estructura fija. La articulación del codo en el exoesqueleto se hace coincidir con el centro de rotación del codo del paciente y la del hombro queda libre. A pesar de esto, sus articulaciones pueden sufrir desalineamientos debido a un mal ajuste al paciente en el inicio de la terapia y a desajustes durante el movimiento, ya sea por el movimiento de los tejidos blandos o por que la persona se mueve respecto al soporte.



a)



b)

Imagen 3.12 y 3.14: a) imagen conceptual del exoesqueleto EXO-UL7. b) Exoesqueleto EXO-UL7.

3.4.9 Exoesqueleto *MEDARM*.

En la Universidad de Queen's, se desarrolla un robot de rehabilitación del complejo hombro-codo para pacientes que han sufrido accidentes cerebrovasculares, el “MEDARM”. Posee 6 grados de libertad, de los cuales 4 son para movimientos del hombro y el codo (3 y 1 respectivamente), y 2 son para la articulación esternoclavicular que le permite elevación/depresión y retropulsión/antepulsión, con el fin de ajustarse a los diferentes tamaños de las personas, además de compensar y estabilizar el movimiento del hombro. El sistema está accionado por un mecanismo de cables y poleas, el cual permite que el miembro superior se mueva en el entorno de trabajo del robot.

Gracias a los dos grados de libertad para la articulación esternoclavicular, se puede ajustar en cierta medida el centro de rotación de la articulación del hombro del exoesqueleto con la de la propia extremidad.

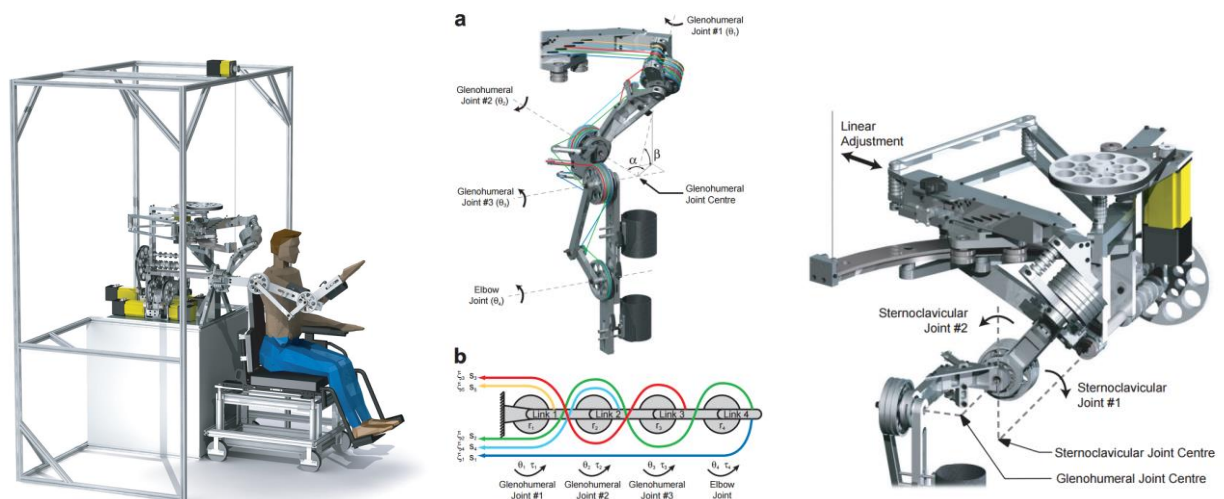


Imagen 3.15: Exoesqueleto *MEDARM*, y detalles del mecanismo de poleas.

3.4.10 Exoesqueleto ESA Human Arm Exoskeleton.

En la agencia espacial (ESA) se desarrolló un exoesqueleto redundante para telemanipulación con retroalimentación de fuerza en ambientes de gravedad reducida. Posee 16 grados de libertad que buscan reproducir los 7 grados de libertad de la extremidad superior. Uno de los principales objetivos de este dispositivo es evitar el Desalineamiento de los centros de rotación de las articulaciones del exoesqueleto con las del brazo, producidas por el movimiento natural de éste, los cuales producen esfuerzos sobre las articulaciones de la extremidad ocasionando dolor e incomodidad.

Si bien no está diseñado para terapias de rehabilitación, es interesante cómo abordan el problema de los CIR de las articulaciones. En el codo, el exoesqueleto posee 4 grados de libertad, 2 de ellos activos para los movimientos de flexión-extensión y prono-supinación mientras que otros 2 GdL son pasivos y buscan compensar el error de desalineamiento, garantizar una sensorización precisa y evitar la transmisión al codo de las fuerzas ejercidas.

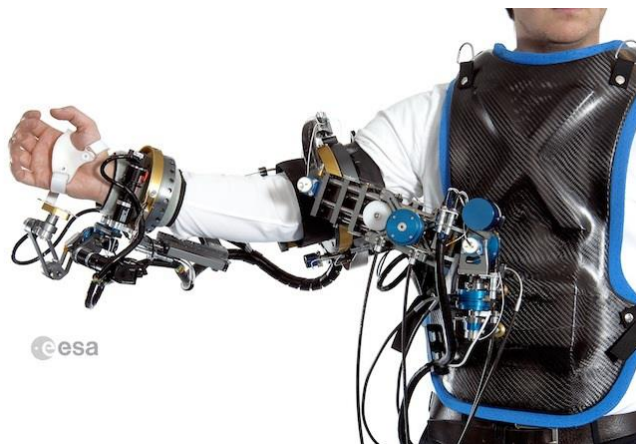


Imagen 3.16: *ESA Human Arm exoeskeleton.*

3.4.11 Exoesqueleto *NeuroEXOS*.

En la Scuola Superior S. Anna di Pisa, se ha desarrollado un exoesqueleto para la articulación del codo “NEUROBOTICS Elbow Exoskeleton (NEROexos)”, diseñado para maximizar el confort y la seguridad del paciente que ha sufrido un ACV. Realiza un movimiento activo de 1GdL para la flexo-extensión, pero además cuenta con un mecanismo de 13 GdL que en conjunto proporcionan 4 GdL pasivos adicionales a la flexo-extensión del codo. De estos 4 GdL pasivos, 3 están diseñados para permitir una rotación pasiva de $\pm 15^\circ$ en el plano frontal y $\pm 21^\circ$ en el plano transversal y 1 GdL permite un desplazamiento relativo de ± 15 mm en el plano transversal. Este tipo de diseño permite compensar los movimientos que ocasionan el ángulo de acarreo del codo, pero no desalineamientos en el plano sagital.

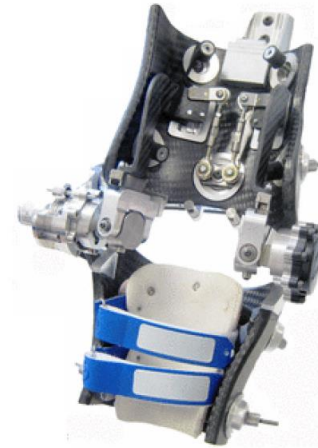
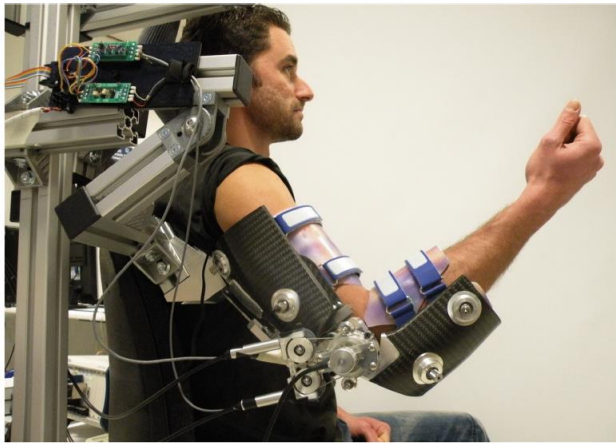


Imagen 3.17: NeuroEXOS.

4. ELECCIÓN JUSTIFICADA DE UNA SOLUCIÓN.

Una vez realizado en análisis de los productos existentes a nivel de fase experimental en el apartado anterior de estado del arte podemos recopilar cierta información acerca de cómo queremos que sea el diseño del dispositivo a realizar.

Cómo se ha comentado anteriormente tenemos varios requisitos a cumplir en el diseño del exoesqueleto que se presenta en este proyecto. De todas ellos el que más nos restringe a nivel de diseño y funcionabilidad es que el dispositivo debe de ser capaz de realizar movimiento en torno a 5 ejes independientes, es decir debe de poseer 5 grados de libertad.

Teniendo en cuenta otros factores como, que sea un dispositivo ergonómico para un uso cómodo en la medida de lo posible por parte del usuario final. O el hecho de que las medidas de este deben de ser correlativas al estándar de medidas del cuerpo humano, es por ello que el diseño de este dispositivo se ha realizado cuidadosamente teniendo en cuenta estos factores.

Un aspecto a tener en cuenta bastante importante es crear un dispositivo que diera alcance a un rango de personas considerable, es decir no crear un único diseño realizado a medida para una persona, sino, en el diseño crear ciertas adaptaciones para que con simples movimientos de las partes que conforman este dispositivo se pueda llegar a adaptar a distintas dimensiones de los posibles usuarios. Es por ello que se ha creado ciertas adaptaciones en el diseño final, como poder adaptar la anchura de espalda, la longitud del brazo y la longitud de la parte de la muñeca y el antebrazo. A parte de la regulación de altura a la que se encuentra el usuario, ya que todos los ejercicios realizados con este dispositivo se van a realizar sentados, bastará con añadir una silla fija regulable en altura, para que la altura de los hombros del paciente este en la posición correcta y poder realizar los movimientos correctamente.

Para que no se produzca desalineamiento entre la extremidad del usuario con el brazo robótico, se ha colocado a la altura del brazo una sujeción entre la máquina y el brazo del paciente. Dicha pieza agarra el brazo del paciente en dos puntos, mediante una correa que no ocasione daño alguno en este, y así conseguiremos un perfecto alineamiento entre extremidad y máquina.

Puesto que va a ser un dispositivo fijo existía la necesidad de acoplar el exoesqueleto en una estructura fija, que aparte de dar una sujeción al exoesqueleto sirve para introducir el cableado que tenga este dispositivo, los circuitos eléctricos y electrónicos, etcétera.

Y por último podemos decir que la elección de los materiales en las piezas de este diseño son de materiales ligeros, ya que no nos interesa que el brazo del exoesqueleto tenga un peso elevado, es por ello que las diferentes piezas están formadas por Aluminio 1060, Poliamida 2200 y ciertas partes de fibra de carbono

Es por ello que se ha realizado el diseño que se detalla a continuación en el siguiente apartado, en base a los requisitos anteriormente comentados y los comentados en el apartado de objetivos y requisitos a cumplir por el dispositivo.

5. DESARROLLO DE UNA SOLUCIÓN.

Como solución a resolver en este proyecto se realiza un exoesqueleto de las extremidades superiores que permitirá al usuario del mismo ejercitar determinados movimientos, tanto pasivamente (en el caso de que dicho paciente no tenga la capacidad de movimiento en las extremidades) o semi-asistido (en el caso de que el paciente pueda realizar determinados movimientos).

En cuanto a la forma de actuar del mismo, se desarrolla una estructura que se acoplará externamente a las extremidades superiores. Tendrá un punto de fijación en la parte del brazo, para evitar desalineamiento de la extremidad respecto al exoesqueleto, así poder realizar los movimientos estipulados correctamente. Este aspecto es muy importante, ya que uno de los factores determinantes para la realización exitosa de movimientos entre máquina y extremidad, es que no exista desalineamiento entre ambas.

5.1 Grados de Libertad en el Exoesqueleto.

Dispone de 5 grados de libertad (GdL), organizados de la siguiente manera; **1 GdL** en la parte de muñeca y antebrazo que permite la rotación, tanto externa como interna (pronación, supinación);

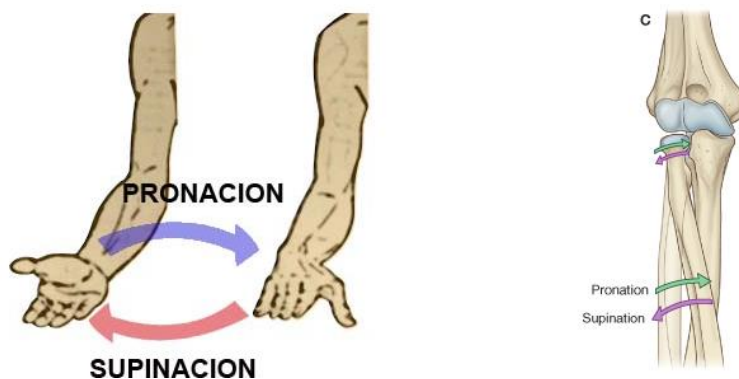
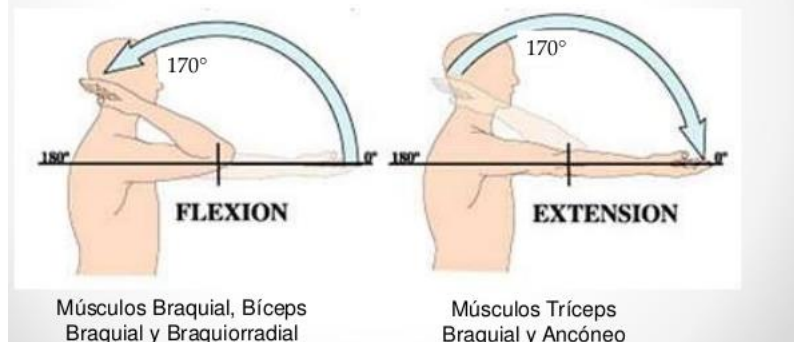


Imagen 5.1: Pronación supinación muñeca.

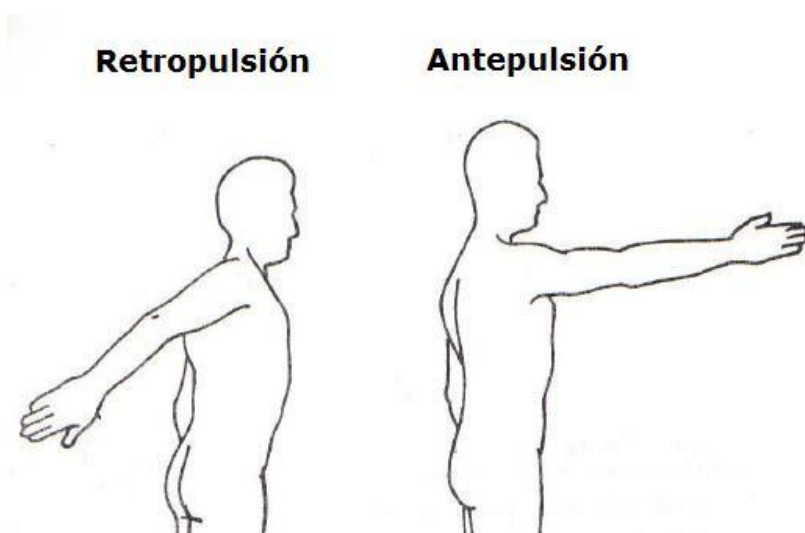
1 GdL en la parte del codo para permitir la flexión extensión del mismo;

- Flexión de 170°
- Extensión 170°



***Imagen 5.2:** Flexión extensión del antebrazo.*

Finalmente **3 GdL** en la parte del hombro, de esos tres grados de libertad, cada uno corresponde a un determinado movimiento; **1 GdL** para la realización de los movimientos de Retropulsión y Antepulsión del brazo;



***Imagen 5.3:** Movimientos de Retropulsión y Antepulsión.*

1 GdL para separación de la extremidad, con respecto a la línea central del cuerpo (Abducción) y para la aproximación de la extremidad al sector proximal, con respecto a la línea central del cuerpo (Aducción);

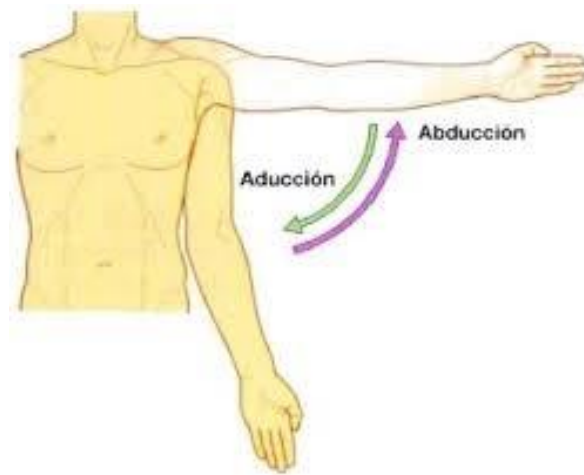


Imagen 5.4: Movimientos de Aducción y Abducción del brazo.

Y el último de todos ellos es para la torsión del hombro, o más conocido como rotación, es decir **1 GdL** para permitir el giro en el hombro.

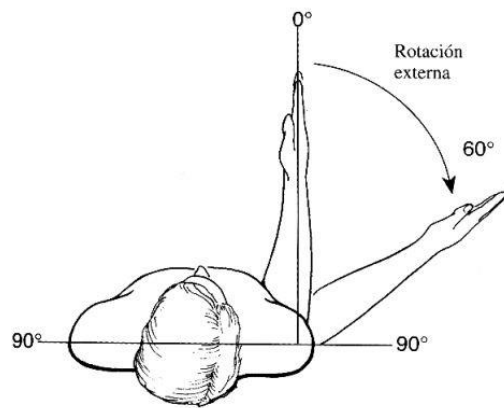


Imagen 5.5: Movimiento de rotación interna externa del brazo.

5.2 Software Utilizado en el Modelado.

Para el desarrollo virtual de este diseño se ha utilizado el Software de Solidworks 2016 Premium. En el que se ha realizado el modelado de cada una de las piezas en 3D para luego ensamblarlas y realizar el conjunto final del diseño desarrollado en este proyecto.

Además realizando el ensamblaje se pudo comprobar que los movimientos que se marcaron como objetivos, es decir que el dispositivo tuviera 5 grados de libertad se cumplió. De modo que también nos sirvió para validar nuestro diseño.

Este Software es una herramienta muy potente tanto para diseñadores como Ingenieros, en la que se puede realizar prototipo virtuales y hacer varias pruebas en ellos ante de crear un prototipo real, para experimentar en este.

5.3 Ubicación de los Servomotores

Cada movimiento realizado por el exoesqueleto, es posible por la incorporación de un servomotor independiente para cada grado de libertad, a excepción del hombro que incorpora un motor adicional para poder permitir realizar los movimientos marcados para realizar este proyecto sin problemas. En el mecanismo de rotación de la muñeca tendremos un motor, en la posición de la articulación del codo otro, y en la posición del hombro tendremos cuatro. Un total de 6 servomotores en cada brazo.

Por lo tanto la disposición de los servomotores a lo largo de nuestro exoesqueleto estará repartida mediante la siguiente organización:

1. En el mecanismo de rotación de la muñeca está acoplado un servomotor, para permitir la rotación del mismo. Dicho servomotor estará acoplado a uno de los brazos articulados de dicho mecanismo, tal y como se puede observar en la imagen. Con la actuación de este motor conseguimos realizar el movimiento de rotación para muñeca y antebrazo.



Imagen 5.6: Detalle del mecanismo de la muñeca.

En dicho eje irá insertado el eje del motor del servomotor, para permitir la rotación del mecanismo.

2. La ubicación del segundo servomotor, se encuentra en la unión del mecanismo de rotación de la muñeca con la primera parte del brazo, anatómicamente esta unión corresponde a la articulación del codo en los brazos. La función de este servomotor es dotar al aparato de la capacidad de movimiento para poder realizar la flexión extensión. A continuación vemos donde iría alojado:

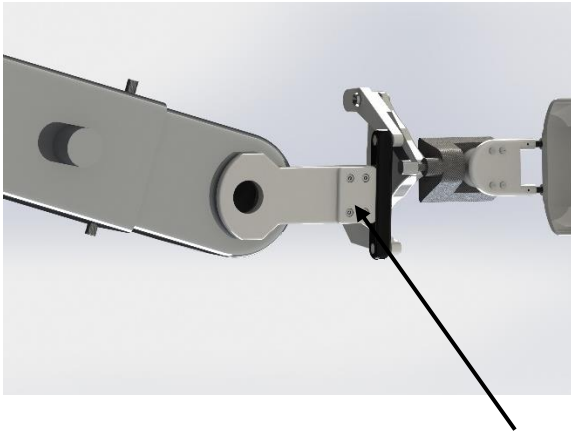


Imagen 5.7: Detalle de la ubicación del segundo servomotor en el exoesqueleto.

La ubicación del segundo servomotor corresponde a la ubicación que podemos ver en la imagen señalada por la flecha.

3. La siguiente ubicación correspondiente al tercer servomotor la encontramos a la altura del hombro, dicho servomotor hará posible la realización de movimientos de Retropulsión y Antepulsión del brazo. A continuación lo podemos observar en la imagen:

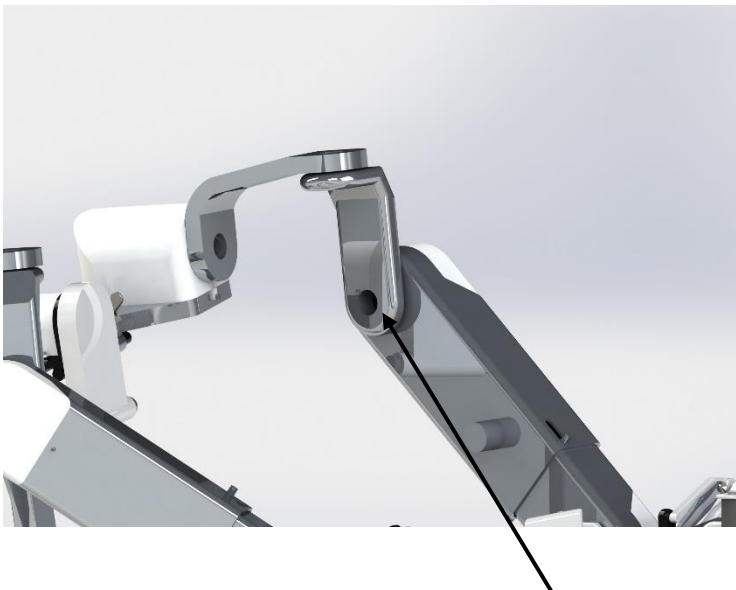


Imagen 5.8: Detalle de la zona de la articulación del hombro en el exoesqueleto.

Ubicación del tercer servomotor en exoesqueleto.

4. Seguimos en la zona de la articulación del hombro, donde se va a describir la siguiente ubicación del servomotor, la cual se encuentra justamente en el plano superior al motor anterior. Con dicho motor se consigue realizar los movimientos de rotación externa y externa del hombro:

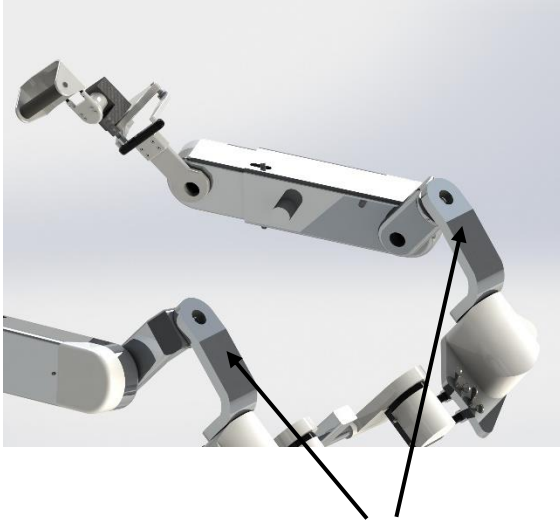
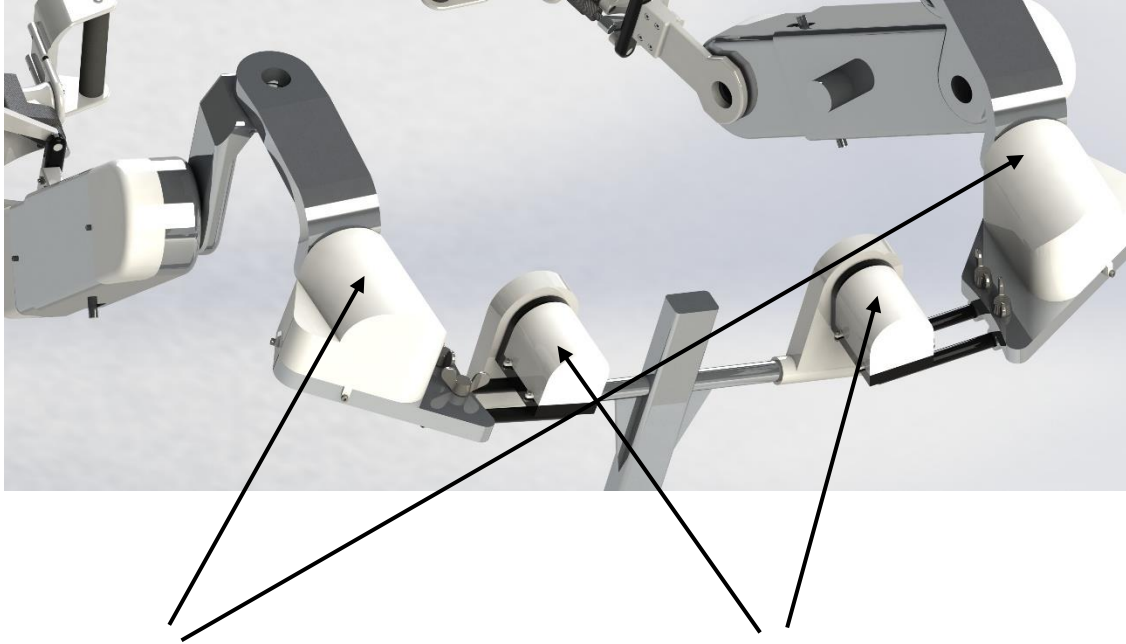


Imagen 5.9: Detalle del mecanismo de la articulación del hombro en el exoesqueleto.

Ubicaciones del servomotor en las articulaciones del hombro, para permitir la rotación externa y externa de la articulación del hombro.

5. Por último vamos a agrupar los dos últimos motores en un mismo apartado, ya que el trabajo de estos dos permite por un lado realizar correctamente la Aducción y Abducción, y por otro lado dota al exoesqueleto de un mayor rango de movilidad, en la siguiente imagen podemos ver su ubicación en el exoesqueleto:



Ubicación de los servomotores que facilitan realizar la Aducción y Abducción.

Servomotores que ayudan a realizar la Aducción y Abducción de un modo correcto, y ayudan a dotar a la máquina de un mayor grado de movilidad.

Imagen 5.10: Detalle de la parte posterior del exoesqueleto, donde se ubican los últimos servomotores del mecanismo.

5.4 Descripción del diseño.

Se va a realizar una descripción de la solución desarrollada, por lo tanto paso a paso en este apartado dentro de desarrollo de una solución se describe el diseño realizado de esta máquina.

Para comenzar a describir este apartado cabe decir de cuántas partes consta el diseño, el cual lo podemos dividir en 5 partes:

1. Estructura.
2. Unión estructura Exoesqueleto.
3. Articulación hombro.
4. Brazo.
5. Antebrazo y mecanismo de Rotación de la muñeca.

Una vez enumeradas la totalidad de las partes, se describen una a una cada una de ellas, para así poder tener una comprensión total del dispositivo, de cómo funciona y de su diseño.

5.4.1 Estructura.

La primera parte del diseño que se describe es la estructura que soportará el exoesqueleto, realizada completamente con perfiles de aluminio, entre los que podemos diferenciar los siguientes tipos de perfiles: Perfiles de sección Cuadrada, Perfiles de sección Rectangular y Perfiles tubulares.

Tabla 5.1: Tipos de perfiles en la Estructura.

Tipo de Perfil	Dimensión
Perfil de sección cuadrada	20x20x2
Perfil de sección cuadrada	30x30x2.6
Perfil de sección Rectangular	50x30x2.6
Perfil tubular	21.3x2.3

Descritos los tipos de perfiles de los que consta la estructura, se muestra una imagen de la misma, las primeras de ellas son mostrando la estructura interna de la misma, para posteriormente mostrar la estructura final con sus chapas fabricadas de aluminio en color blanco.

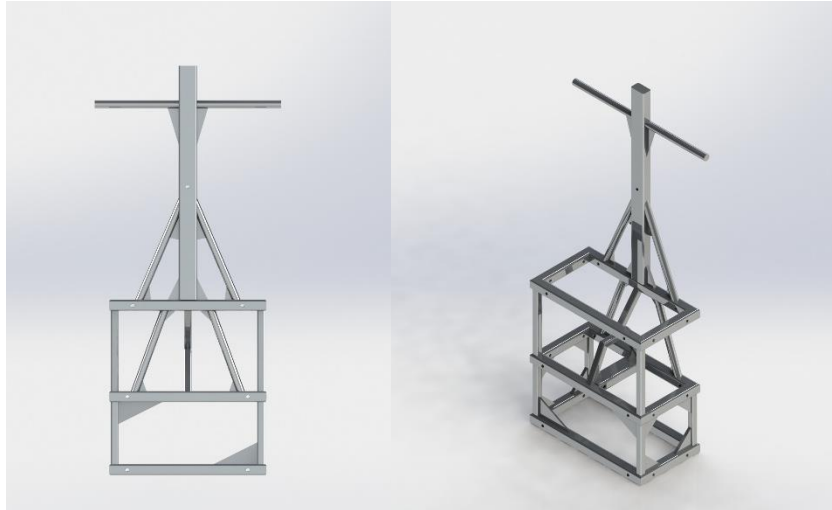


Imagen 5.11: Estructura del exoesqueleto.

En estas imágenes podemos ver la estructura completa, en la que podemos apreciar los distintos tipos de perfiles, y también unas cartelas en algunas de las esquinas para reforzar nuestra estructura. Todas las uniones entre cartelas y los distintos tipos de perfiles están soldadas con cordones de soldadura de 2,6 y 3,61.

En los perfiles tubulares serán donde estén alojados los primeros servomotores que estos a su vez irán conectados a la primera parte de la articulación correspondiente al hombro, y que a partir de ahí se extenderán los demás componentes que forman la estructura del exoesqueleto.

En las siguientes imágenes podemos ver el proceso de ensamblado de la estructura con sus chapas:

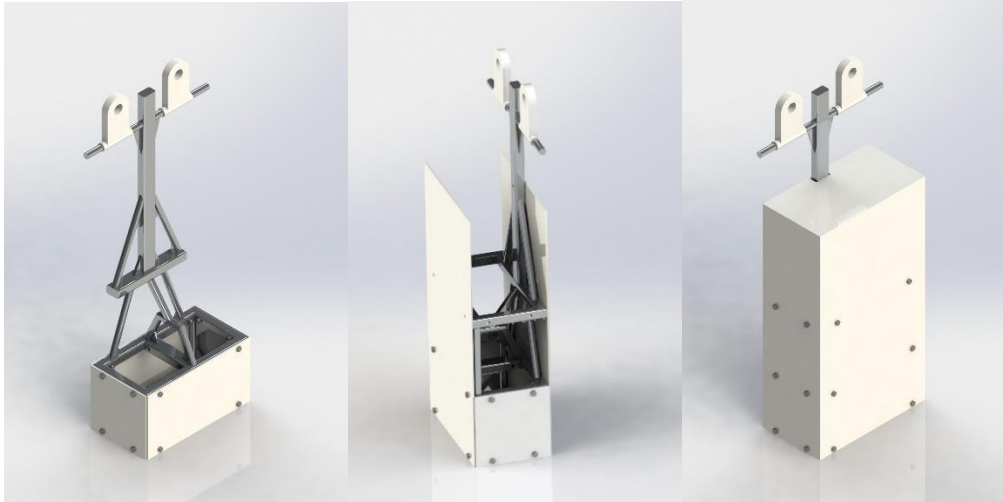


Imagen 5.12: Construcción de la estructura/soporte del exoesqueleto.

5.4.2 Unión Estructura Exoesqueleto.

En este subapartado se muestra cómo y de qué manera se va a conectar el exoesqueleto a la estructura que lo soportará, en la siguiente imagen podemos ver la pieza de unión a la que va unida la primera carcasa donde irá alojado un servomotor.



Imagen 5.13: Detalle pieza de unión.

Esta pieza está sujeta al perfil de sección tubular por medio de dos tornillos en la parte inferior de dicha pieza, que hacen presión en el tubo de sección tubular, para así poder regular la anchura entre ambos para las distintas dimensiones de los usuarios.

Dicha pieza tiene que tener un ajuste forzado medio, y los tornillos a presión hacen de tope para impedir la rotación de esta pieza en el perfil tubular.

En la parte posterior de la pieza mostrada anteriormente, es donde va conectada la carcasa que alojará en su interior el primer de nuestros servomotores (Empezando anatómicamente desde el hombro a la muñeca), en la siguiente imagen lo vemos en más detalle.

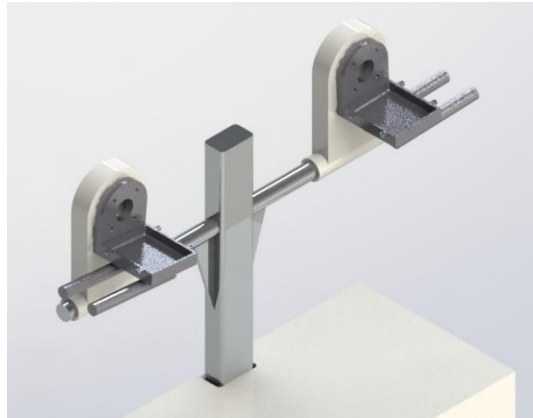


Imagen 5.14: Detalle unión carcasa primer servomotor.

Ahora en la siguiente imagen podemos ver terminada la pieza de la carcasa terminada y ensamblada.

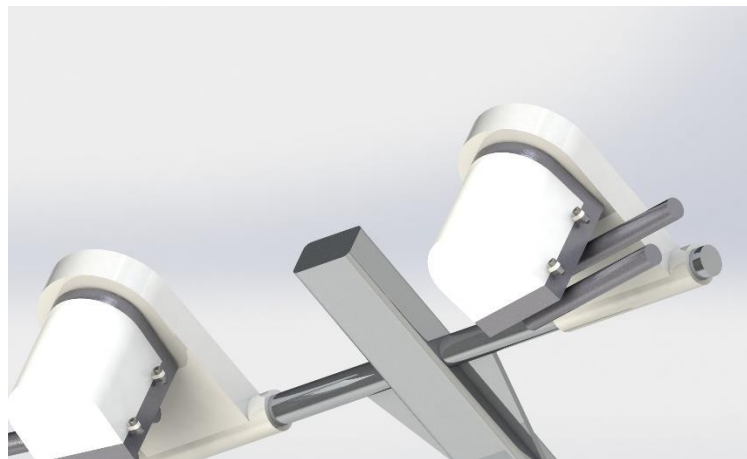


Imagen 5.15: Imagen de detalle de carcasa ensamblada.

5.4.3 Articulación del Hombro.

Siguiendo con la descripción del diseño pasamos a comentar la zona de la articulación del hombro, que junto con el mecanismo de rotación de la muñeca-antebrazo supone una de las zonas más complicadas en cuanto a diseño y funcionamiento se refiere. Ya que por un lado, se debe de encajar la estructura perfectamente para que el usuario no note la mínima molestia, dicho de otra manera esta parte del diseño no debe tocar a el paciente para no interferir entre movimiento de las partes de la articulación del hombro de la máquina, con la extremidad del usuario para conseguir un perfecto funcionamiento.

Y por otro lado, dicha zona debe de conseguir un movimiento con tres grados de libertad, ya que es uno de los objetivos planteados, para conseguir un movimiento lo más real posible, para que la práctica con dicho dispositivo sea funcional y útil.

Los tres grados de libertad a conseguir realizar con el dispositivo, se ven reflejados en la siguiente imagen mediante los tres distintos ejes (X,Y,Z).

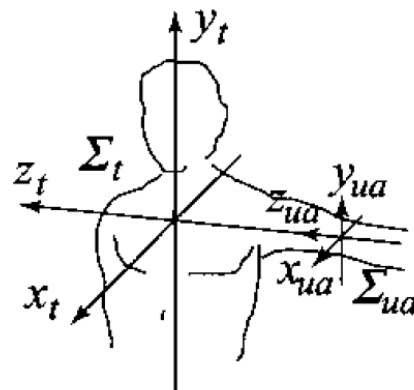


Imagen 5.16: Representación por medio de ejes de los 3 grados de libertad del hombro.

Antes de llegar a la conclusión final se valoró que solución podría ser compatible para el diseño, tanto a nivel estructural como a nivel funcional, para ello es conveniente saber la anatomía interna del hombro.

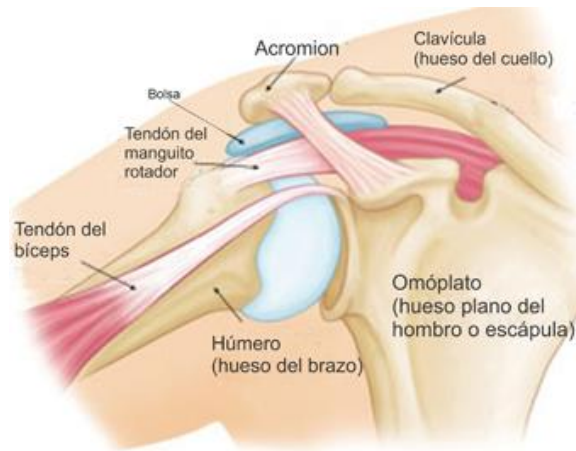


Imagen 5.17: Anatomía del hombro.

Llegados a este punto, la primera opción fue crear una unión imitando a la anatomía real, del tipo a cómo las que se ven en las imágenes a continuación.



Imagen 5.18: Ball and Socket joint.

En este punto cabe hacerse la pregunta de ¿Entonces cómo encajar esta unión mecánica en el diseño que se plantea y se desarrolla en este proyecto? Ya que no sólo basta con plantear una solución funcional, sino una solución estructural y dentro de ciertos márgenes crear una estética atractiva en este.

Por lo tanto esta primera solución no es válida para este proyecto, suponiendo esto se presenta la situación de tener que buscar y desarrollar otra alternativa válida para este diseño.

Analizando varias alternativas para llegar a una conclusión definitiva, se plantea la opción de que la articulación robótica del hombro imite o sea lo más parecido al mecanismo esférico que se muestra en la imagen.

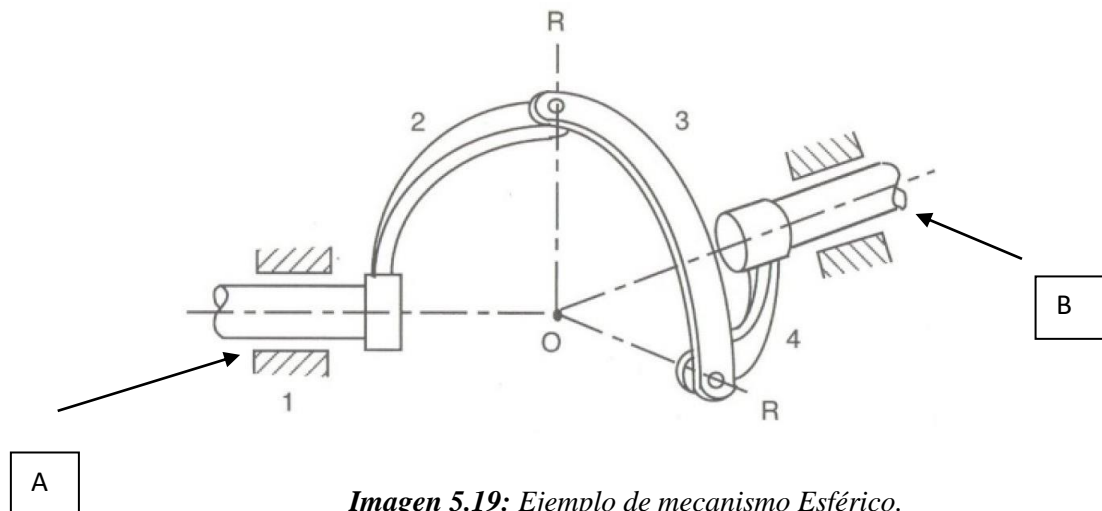


Imagen 5.19: Ejemplo de mecanismo Esférico.

Con este mecanismo podemos conseguir el objetivo de dotar a nuestra articulación con 3 Grados de libertad, la idea principal del mecanismo del hombro en este exoesqueleto es la misma que la de la imagen superior, pero con una distribución espacial en distintos planos, y por supuesto tras unas variaciones estructurales se llega una solución válida, tanto a nivel de diseño estructural y funcional.

En este instante se llega a la solución definitiva en el diseño, primero se muestra el conjunto de la articulación completa, para después detallar cada una de sus partes. Entonces en esta primera imagen se puede observar el conjunto completo de la articulación del hombro.

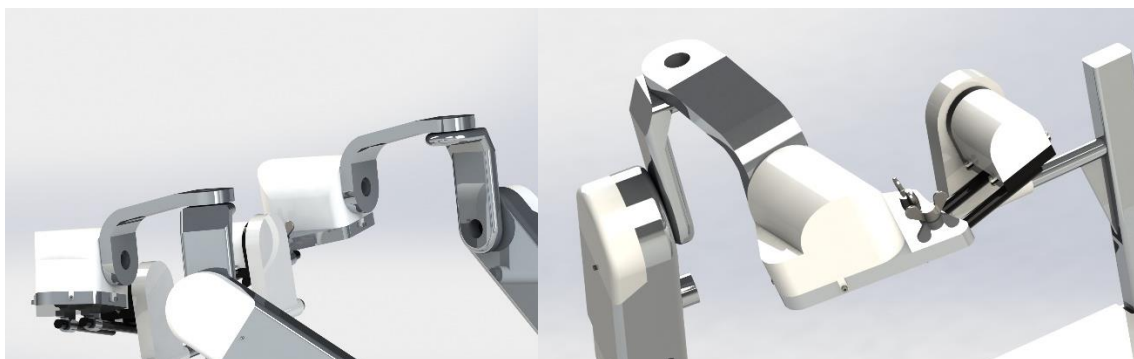


Imagen 5.20: Articulación hombro.

Como se observa en la imagen, en la articulación podemos distinguir distintas partes; La primera de ellas sería la parte que va unida a la carcasa donde se aloja nuestro servomotor, entonces la primera parte de la articulación del hombro va unida a las dos barras paralelas y ajustada a presión mediante dos tornillos de mariposa DIN 316 M10x30.

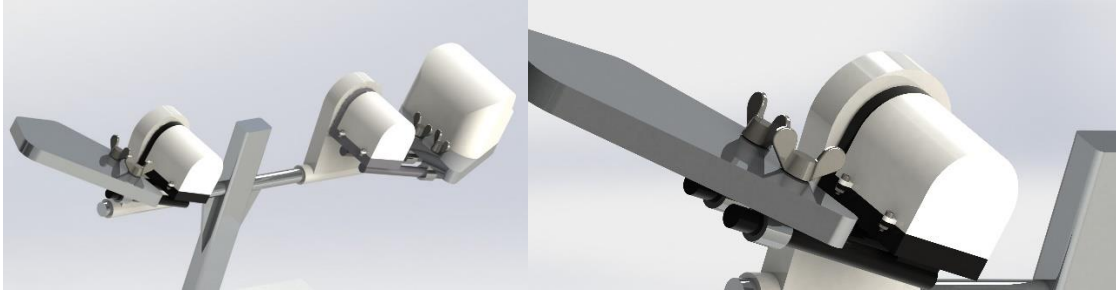
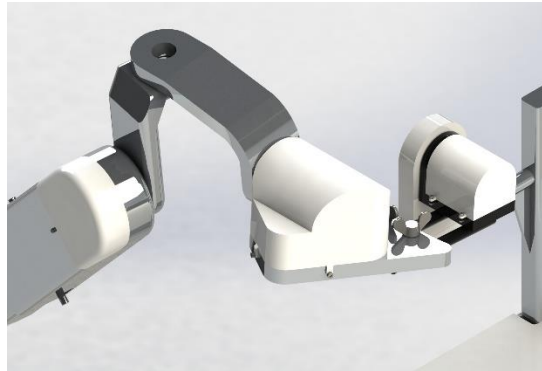


Imagen 5.21: *Detalle de la primera parte de la articulación del hombro.*

Una de las claves de esta parte radica en que dicha pieza pueda ajustarse a distintas anchuras de espalda del usuario final (Paciente). Es por ello que se decidió que la primera parte de la articulación pudiera regularse en anchura, por lo tanto a estas alturas de descripción del diseño, vemos que ya tenemos posibilidad de dos distintos ajustes a nivel de anchura de usuario, el primero de ellos es el comentado en el apartado “5.3.2 Unión Estructura Exoesqueleto” y el que se comenta en este apartado. Las barras paralelas salientes de la carcasa van conectadas a un perfil tubular hueco en la primera pieza de la articulación del hombro, entre sí tienen un ajuste forzado ligero, al tratarse de una unión de dos barras el giro lo tenemos impedido, pero no el deslizamiento, es por ello por lo que se utiliza el ajuste a presión mediante los tornillos de mariposa. De este modo se podrá regular la anchura entre ciertos intervalos para los distintos tipos de pacientes.

En esta pieza también hay otra carcasa para alojar un servomotor más en nuestro diseño.

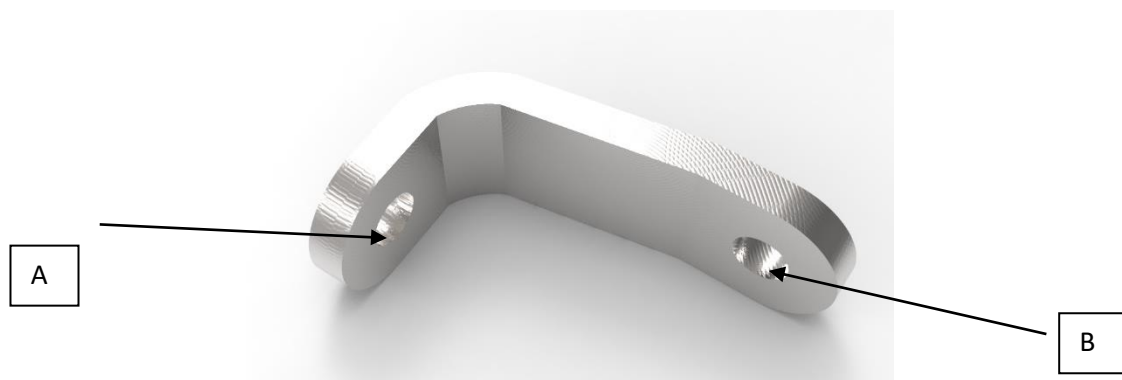


***Imagen 5.22:** Detalle de carcasa de primera parte de hombro.*

El servomotor que se aloja dentro de esta carcasa dota a la pieza que va unida al eje de este motor de rotación, así conseguimos ir definiendo los movimientos que queremos lograr en dicha articulación.

Avanzando en la descripción del mecanismo, seguidamente se comentan las piezas articuladas que terminan de conformar la articulación del hombro. De dichas piezas se pueden hacer varios comentarios:

1. Estas piezas sirven de unión entre la estructura y el mecanismo que conforman la extremidad superior robótica, o mejor dicho el exoesqueleto.
2. Existe cierta complejidad en su diseño y forma, y también en su manera de funcionamiento, es decir de la manera en que se van a mover.
3. Otro aspecto a tener en cuenta es saber cuántos servomotores van unidos a cada pieza, en la pieza superior de la estructura, que vemos a continuación;



***Imagen 5.23:** Detalle pieza hombro superior.*

Tenemos dos servomotores, el primero de ellos es el que está alojado en la segunda carcasa, perteneciente a la primera parte del hombro, según lo descrito anteriormente. En la imagen podemos ver que corresponde a la ubicación señalada por el punto A). En dicha ubicación la pieza irá fija al eje de dicho motor para que esta pueda tener giro. Y en cuanto al segundo servomotor está ubicado en la posición señalada por el punto B), por esta cavidad saldrá el eje de este motor para acoplarse a la siguiente pieza que mostramos a continuación.

La siguiente pieza va colocada por la parte inferior de la pieza anterior en la posición del agujero correspondiente al señalado por el punto B).



Imagen 5.24: Detalle segunda pieza de la articulación del hombro.

Esta es la última parte de la articulación del hombro en el exosqueleto. La posición marcada por el punto B) va conectada a la pieza descrita y mostrada anteriormente por su parte inferior, por la cual sale el eje del servomotor alojado ahí, y fijada a esta pieza para permitirle rotar en un plano diferente en comparación a la rotación de la pieza anterior. Y luego en la posición marcada por el punto A) irá alojado un servomotor que se introducirá en la carcasa del brazo para poder permitir a la estructura del exoesqueleto realizar los movimientos de Retropulsión y Antepulsión, el eje de dicho servomotor tendrá que ir fijado a la caja del brazo para que este en toda su extensión pueda realizar los movimientos descritos anteriormente.

Es decir, el motor alojado en el agujero de la posición A) ocupará cierto espacio en la cajera del brazo, pero el eje saliente de este motor tiene que estar fijado a una parte de esta cajera, ya que al girar el eje del motor girará solidariamente el resto de la estructura, realizando así los movimientos de Retropulsión y Antepulsión.

Con el mecanismo y el funcionamiento descrito anteriormente conseguimos los 3 grados de libertad, definidos por objetivos, y por lo tanto podemos dotar al exoesqueleto de una amplia gama de movimientos. En la siguiente imagen podemos ver los tres grados de libertad en el hombro, representados mediante tres ejes de rotación en tres planos.

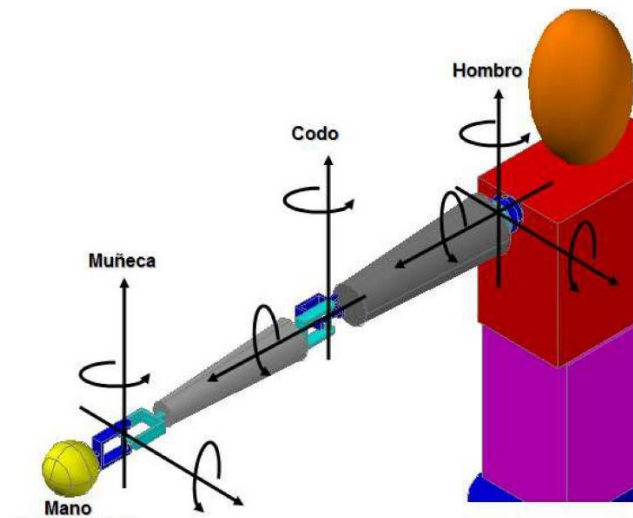


Imagen 5.25: Grados de libertad totales en el brazo.

De todos los grados de libertad representados en este esquema, en el exoesqueleto, se omite uno, el cual corresponde al movimiento de flexión extensión de la muñeca, ya que sólo se realiza en este dispositivo el movimiento de rotación en dicha articulación. Si nos fijamos en la parte del hombro podemos observar los tres grados de libertad que tiene dicha articulación.

5.4.4 Brazo.

En este subapartado se describe la estructura del brazo, que por un lado, va acoplado a la parte del mecanismo anteriormente descrita y explicada (Articulación del hombro) y por otro lado va acoplado el mecanismo de rotación de la muñeca y parte del antebrazo, para así finalmente terminar de describir el exoesqueleto.

En la sección del brazo se puede distinguir fácilmente dos partes, una de ellas sería una cajera de la parte superior al brazo, dicha pieza va ensamblada a la articulación del hombro, y la otra sería la segunda cajera, que va ensamblada al conjunto de rotación de la muñeca y parte del antebrazo.

A continuación se muestran las imágenes de cada parte, para poder comprender de una manera más precisa su morfología y su función dentro de este dispositivo.

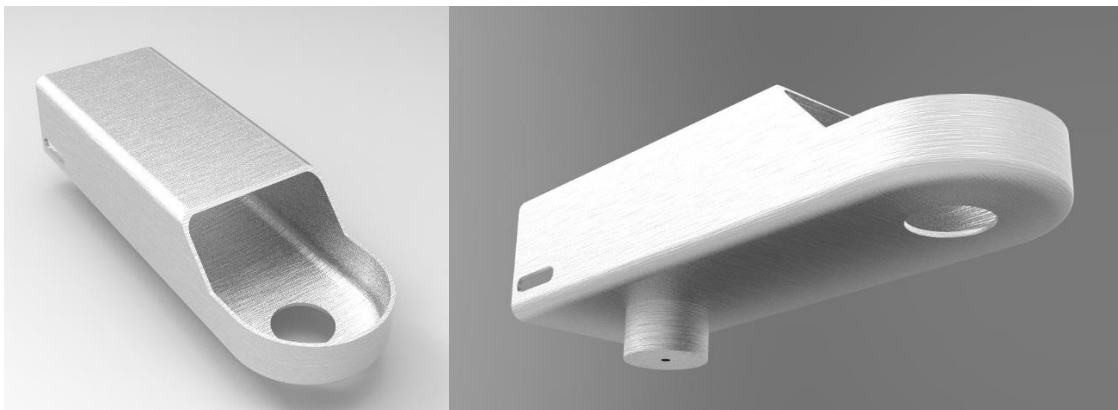


Imagen 5.26: Detalle Cajera Superior del Brazo.

En estas dos imágenes podemos ver en detalles la cajera superior del brazo. Se pueden observar varios detalles, por comentar todos ellos, podemos observar el agujero de la parte superior, el cuál será donde se ensamble la con la segunda pieza de la articulación del hombro y donde irá alojado un servomotor para que la estructura del brazo pueda moverse, y así realizar los movimientos de Retropulsión y Antepulsión.

Al final de la cajera se ve una ranura, dicha ranura es donde encaja la otra parte que forma la estructura del brazo, y sirve para tener un margen de ± 40 mm para poder ajustar a los diferentes tamaños de brazos de los posibles usuarios del dispositivo, así conseguimos regular posibles longitudes de extensión del brazo, que junto a los distintos ajustes existentes en la parte de la articulación conseguimos adaptar el dispositivo a un grupo de usuarios importante.

En las imágenes también se puede ver un cilindro saliente con un agujero, esa parte es donde se colocará la sujeción al brazo, es decir, en esa parte encaja una pieza vital para un funcionamiento correcto, y a que ahí está acoplada la sujeción al brazo, para impedir que entre la extremidad del paciente y nuestro dispositivo se produzca un desalineamiento, originando así un mal ejercicio de rehabilitación.

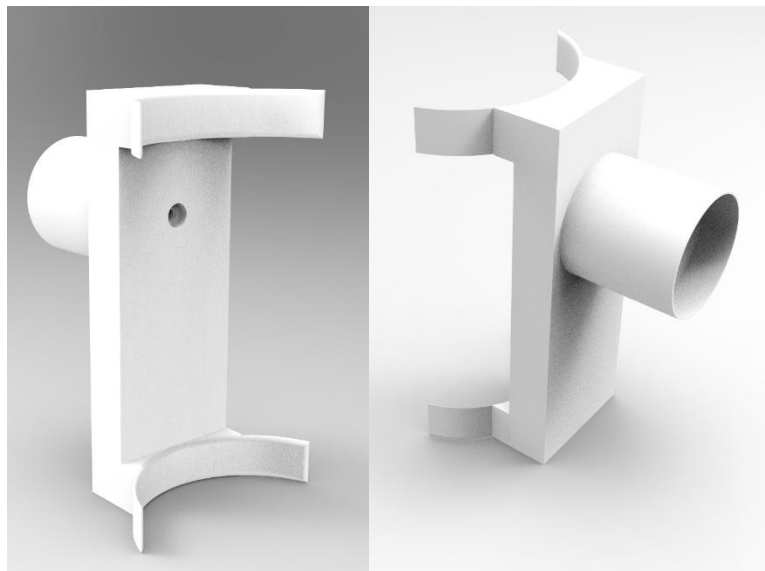


Imagen 5.27: Detalle de Sujeción al Brazo.

A esta pieza le falta de incorporación de una correa, podría ser con velcro o algún método de sujeción parecido, que no ocasione demasiada molestia quitarlo, y por supuesto la mayor parte de esta pieza iría recubierta de algún tejido acolchado, ya que es una de las piezas que va a estar en contacto directo con el usuario, para que así no llegue a ocasionar ninguna molestia en este.

La siguiente pieza a comentar es la otra parte que conforma el brazo, es decir la segunda cajera que va ensamblada en la descrita anteriormente, esta pieza conformará por completo la parte del brazo, y a su vez, la pieza a describir a continuación ensamblará con el mecanismo de rotación de la muñeca y el antebrazo.

En cuanto a dimensiones, esta cajera es más pequeña que la anterior, ya que primero esta debe de encajar en la anterior, por lo tanto es más estrecha, y segundo debe de ser más pequeña en cuanto a longitud ya que por las dimensiones de las extremidades humanas el diseño de la misma así lo requiere.

En la siguiente imagen podemos observar la segunda cajera que conforma la estructura del brazo.

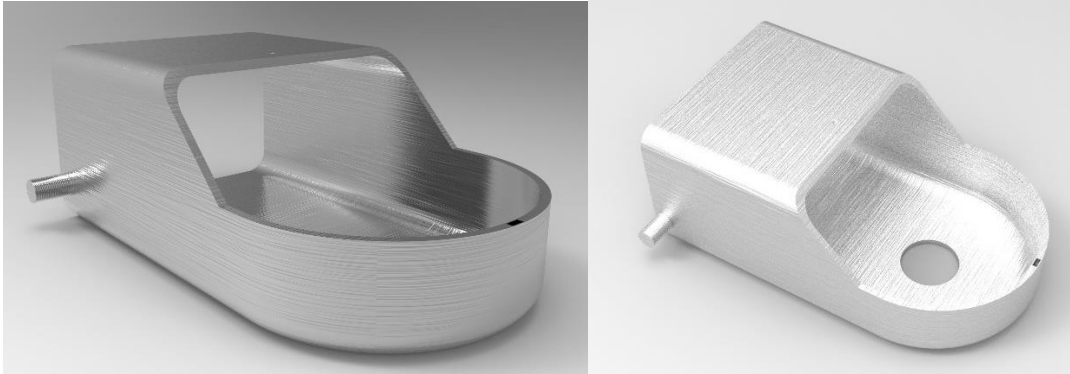


Imagen 5.28: Detalle de Cajera Inferior del Brazo.

Como se puede observar existe un saliente en esta cajera que es el que va insertado encajado en la ranura de la cajera superior, así podremos regular la longitud en un rango de ± 40 mm la longitud del brazo, para bloquear el movimiento longitudinal de esta cajera sobre la otra, los salientes tienen una rosca de M10, y se bloqueará mediante el apriete por tuerca.

El agujero que podemos observar en la imagen de la derecha es la ubicación de otro servomotor por el cual saldrá el eje para ensamblar con la parte del mecanismo de rotación, y así poder realizar los movimientos de flexión extensión del codo.

Como podemos ver en las dos cajeras en la ubicación donde se encuentran los agujeros para poder ser ensamblados con las demás partes del exoesqueleto, existen unas cavidades sin tapar, estas cavidades es el hueco donde se alojarán los servomotores, y el hueco de dentro de estas cajeras aparte de alojar los servomotores, existe el hueco suficiente para el cableado necesario, circuitos electrónicos, sensores de movimientos etcétera.

Las tapas de dichas cavidades se muestran a continuación.

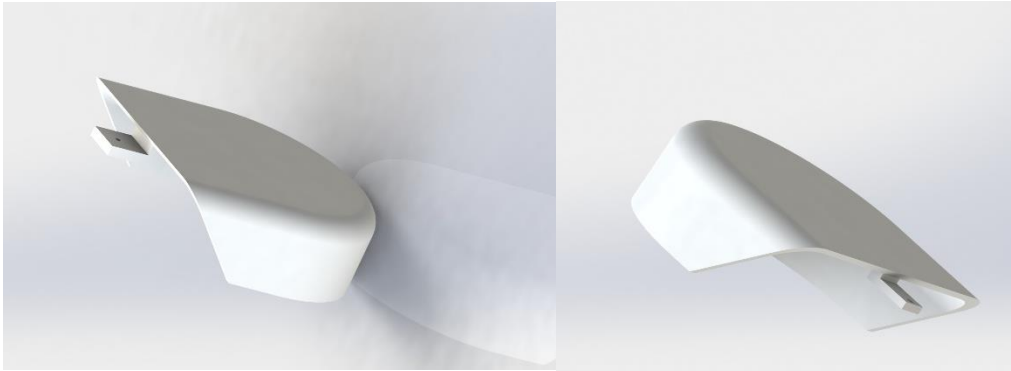


Imagen 5.29: Tapas de las cajas Superior e Inferior respectivamente.

5.4.5 Antebrazo y Mecanismo de Rotación de la Muñeca.

Llegados a este punto, la última parte a comentar del diseño del exoesqueleto se describe el mecanismo correspondiente a el Antebrazo y el mecanismo de rotación de la muñeca, el cual va ensamblado a la cajera inferior del brazo, para poder permitir el movimiento de flexión extensión del codo.

Dicho mecanismo junto con el correspondiente a la articulación del hombro es uno de los más complicados a diseñar en este exoesqueleto. Se va a seguir el mismo procedimiento como el que se ha seguido en el apartado 5.3.3 Articulación del Hombro, es decir, primero se describe un mecanismo existente que nos sirve de ejemplo a seguir para el diseño final del mecanismo realizado para esta parte del exoesqueleto.

Por lo siguiente, lo primero que tenemos que tener claro es que queremos conseguir, y esto es poder realizar un movimiento de rotación, para ello el diseño de esta parte está basado en el diseño y funcionamiento de mecanismos paralelos, en la siguiente imagen podemos ver un ejemplo de este tipo de mecanismos.

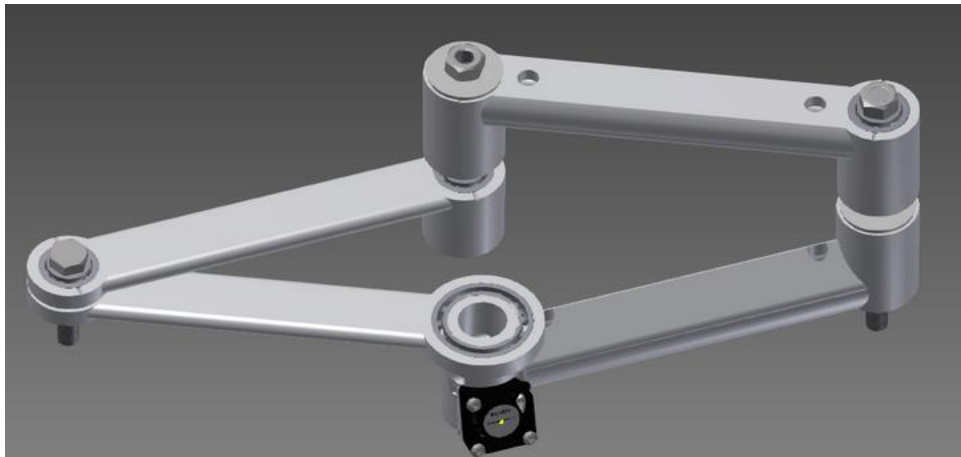


Imagen 5.30: Ejemplo de Mecanismo Paralelo.

Al querer realizar un movimiento de rotación oscilante este mecanismo nos sirve de base para el objetivo de llegar a una solución válida en el diseño.

Poco a poco se fueron desarrollando una serie de alternativas y tras madurar ciertas opciones se creó una pequeña maqueta para poder visualizar físicamente un modelo aproximado que cumpliera la función de movimiento propuesta inicialmente.

De esta manera podemos ver en las siguientes imágenes la primera aproximación a la que se llegó para finalmente desarrollar el diseño final.

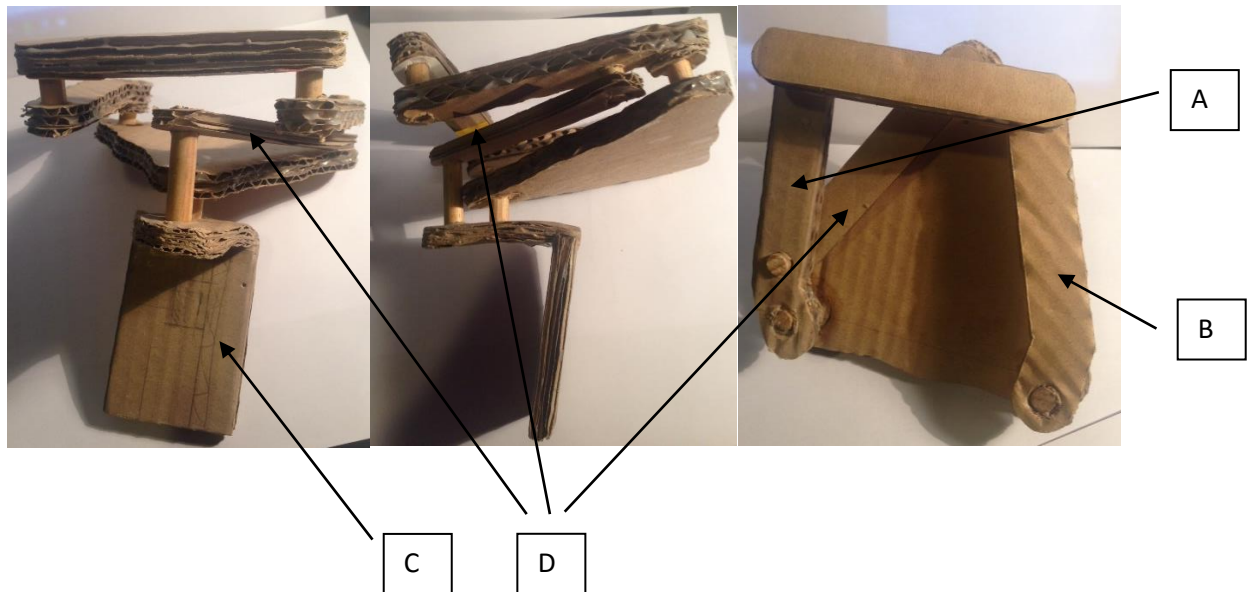


Imagen 5.31: Maqueta en Cartón del Mecanismo de Rotación.

Una vez realizada esta maqueta se puede visualizar todo de una manera más clara, de entre todas las cosas positivas que se pudieron obtener de ello una de ellas fue la forma en la que se iba a comportar el mecanismo, ya que una de las claves para el correcto funcionamiento es que a la vez que rotan los brazos A) y B) gire también la pieza donde va conectado el manguito que se agarrará con la mano C), para ello es necesario la incorporación de un tercer brazo D), que hace de conexión con los brazos A) y B) y que a la vez que estos giran lo haga también la pieza C).

Puede que esto llegue a confusión, ya que a pesar de ser un mecanismo de brazos paralelos simple existen varias conexiones que son vitales para un correcto funcionamiento.

Para una mejor visualización de esta idea se muestra el conjunto final del mecanismo de rotación de la muñeca y el antebrazo.

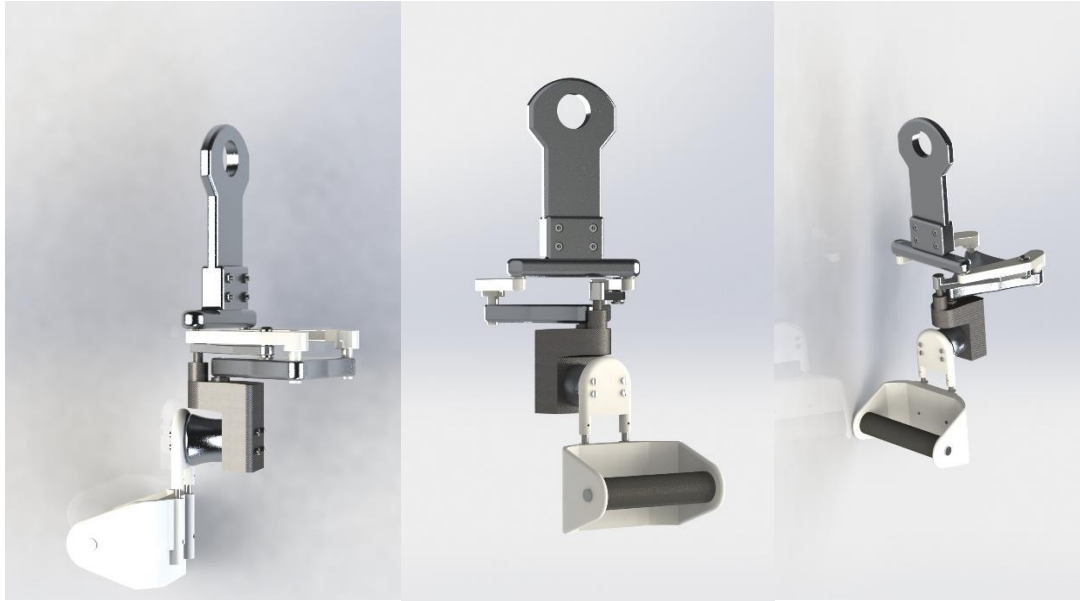


Imagen 5.32: Mecanismo de Rotación de muñeca y antebrazo definitivo.

En la imagen superior podemos observar al detalle el mecanismo final perfectamente, el cual realiza una rotación suficiente para lograr un funcionamiento correcto. Y la siguiente imagen sirve para mostrar un ejemplo visual de cómo queda definitivamente ensamblado con la cajera inferior del brazo.

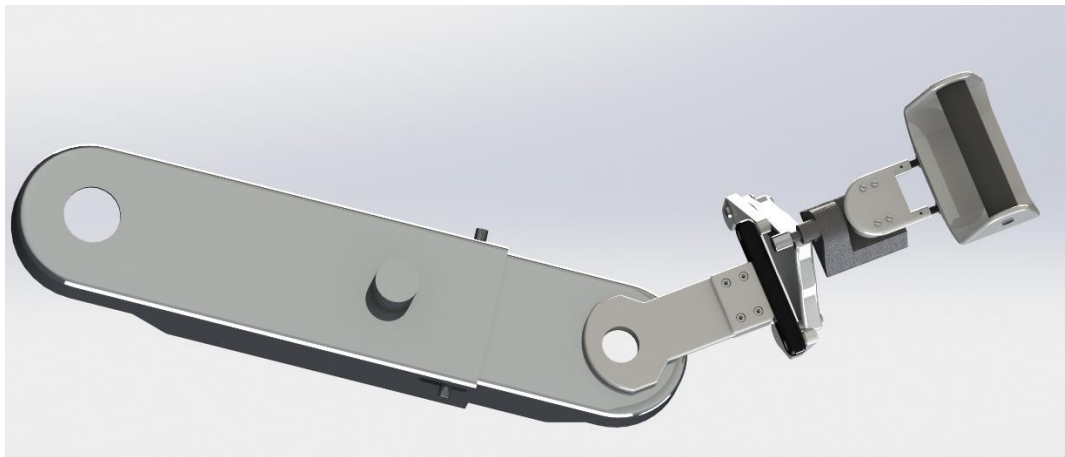


Imagen 5.33: Detalle de ensamblado entre Mecanismo de rotación de Muñeca y Antebrazo y Cajera Inferior del Brazo.

5.5 Materiales Utilizados en el Diseño.

Para una adecuada elección de materiales en el diseño hay que tener en cuenta varios factores clave, estos factores pueden ser, Resistencia, durabilidad a esfuerzos de fatiga, materiales fácilmente mecanizables, ligereza, coste de los mismos... y un largo etcétera.

De todos los factores descritos anteriormente, puede ser que el más determinante de todos ellos para nosotros sea el uso de materiales ligeros, puesto que este factor hay que tenerlo muy en cuenta en el diseño, ya que al menos la parte móvil del exoesqueleto debe ser ligera, es decir desde la unión del brazo con la estructura hasta la parte de la muñeca, tenemos que realizar una elección de materiales ligeros para formar las piezas que lo conforman.

Bajo este criterio realizamos una elección de materiales que cumplieran con esto, dichos materiales fueron Aluminio 1060 (Al 1060) para todas las piezas metálicas, para los perfiles de la estructura y las chapas que recubren dicha estructura.

Fibra de Carbono Hexcel AS4C para reforzar la pieza de rotación que conecta con la abrazadera en nuestro conjunto de rotación del brazo, y que cuyo cuerpo está fabricado con el siguiente material PA2200.

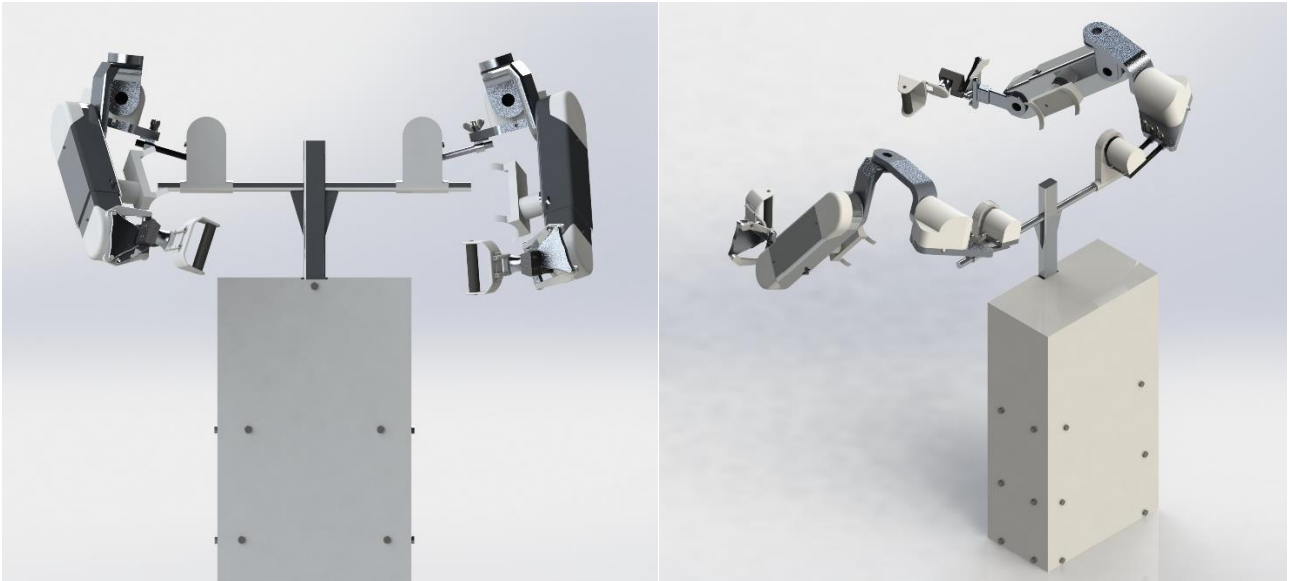
Poliamida PA 2200 para las piezas plásticas como la sujeción del brazo, el protector del manguito o la abrazadera para las dos guías, o las tapas y carcasas de los servomotores.

Cómo dato podemos decir que el peso total de cada brazo con la elección de estos materiales, desde la parte de unión del mismo con la estructura hasta la parte del protector del manguito (Parte final del exoesqueleto), tiene un valor total de 6961,1 Kg (Valor calculado con Solidworks), es decir un valor aproximado de unos 7 Kg, lo cual no es un valor de peso desorbitado y lo damos por bueno.

Además teniendo en cuenta que el valor del peso medio de los brazo en los Humanos es de unos 3,82 Kg, los motores empleados en este dispositivo tendrán que levantar un peso total de alrededor de 11 Kg, con lo cual se podrá hacer sin ningún problema.

5.6 Diseño Final.

En este apartado final de descripción del diseño podemos observar el diseño final del exoesqueleto realizado, mediante unos renders obtenidos del programa Solidworks, a lo largo de la descripción del diseño hemos ido mostrando varias imágenes de detalle de varias de las partes del exoesqueleto, que se corresponden al diseño final. Por lo tanto las imágenes mostradas a continuación muestran la estructura entera de dicho dispositivo.



Imágenes 34 y 35: Diseño Final del Exoesqueleto.

6. MODELO DE NEGOCIO.

La elaboración de dicho producto viene marcado por el objetivo de crear una solución a una necesidad real, y por supuesto en el caso ideal de tener un producto terminado completamente, este proyecto ha de tener una visión más allá, una visión de cómo va a llegar a la gente que realmente lo necesita.

Llegados a este punto cabe hacerse la pregunta de, ¿Para quién va destinado este producto? A lo largo del desarrollo de este proyecto, se ha detallado específicamente quienes van a ser los usuarios, y porqué. Entonces ¿Es algo que cada usuario pueda disponer en su propia casa? La respuesta a esta pregunta es no, ya que una de las funciones principales de la creación de este dispositivo es que sirva de herramienta para la rehabilitación, una herramienta para lograr una automatización de ciertos procesos, agilizando así estos.

Es por tanto que la presencia de un fisioterapeuta sea imprescindible, ya que este será el encargado de supervisar y realizar el tratamiento de rehabilitación a esta persona. Es decir el usuario de este producto sería un paciente, y el supervisor sería un fisioterapeuta, con lo cual es un producto que va destinado al fisioterapeuta, aunque este no sea el usuario final. Por lo tanto, ¿Cuáles serían los lugares donde nuestro producto encajaría mejor?

Para resolver esta pregunta, lo mejor es saber que hacen las grandes compañías que se dedican a este sector para realizar un estudio de “Benchmarking”. Para ello el modelo que más encaja en este proyecto, sería el creado por una empresa, de la que ya se ha hablado en los primeros apartados de este documento. Esta empresa es muy potente en este sector, y se llama “**EKSO BIONICS**”. Es una empresa Norteamericana y se dedica a diseñar, desarrollar, fabricar y vender exoesqueletos de las extremidades inferiores, cuyos productos están muy bien realizados, son precisos y tienen un diseño estético atractivo. Actualmente tiene dos opciones de negocio, una de ellas sería en el sector Industrial, y la otra opción es en el ámbito de la Rehabilitación, como en nuestro caso.

En su catálogo principal diferenciamos claramente estos dos productos, por un lado tienen un exoesqueleto de las extremidades inferiores para usos industriales llamado Ekso-Industrial.



Imagen 6.1: Ejemplo de Exoesqueleto Ekso-Industrial.

Y por otro lado, otro modelo también para las extremidades inferiores con fines para la rehabilitación, como es el caso de este proyecto.

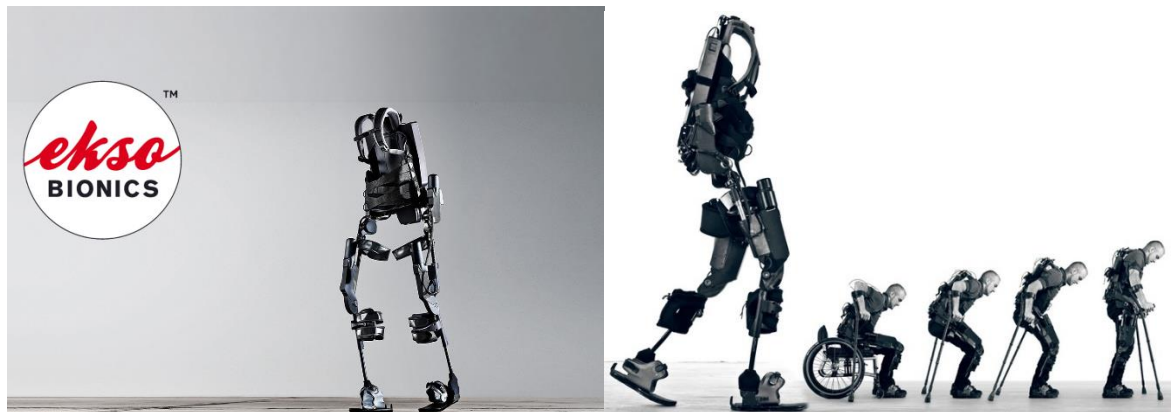


Imagen 6.2: Exoesqueleto de la compañía Ekso-Bionics destinado para la rehabilitación de las extremidades inferiores.

Entonces centrándonos en lo que se refiere a este proyecto, el modelo que encaja con la posible oferta de negocio existente, es el que realiza con su producto/exoesqueleto destinado a la rehabilitación. ¿A quién vende sus exoesqueletos esta empresa? Pues bien, esta empresa se dedica a vender sus exoesqueletos a centros especializados en tratamiento de pacientes con dificultades motoras, es decir, a centros de rehabilitación específicos para tratar a este tipo de pacientes.

El elevado coste de sus dispositivos, los cuales una vez que salieron al mercado y empezaron a comercializarse rondaban los 100.000\$, con esta cifra parece disparatado que muchos centros en el mundo quieran, o puedan disponer de este tipo de dispositivos.

Ciertamente cabe pensar lo anteriormente comentado, pero solamente tenemos que buscar en su página web para ver la cantidad de centros en el mundo que ya disponen de dicho dispositivo para tratar a sus pacientes mediante un entrenamiento real, ya que estos caminan con la ayuda de este dispositivo. Como ejemplo, la imagen mostrada a continuación esta sacada de la página web de Ekso-Bionics, en la cual podemos observar un mapamundi con la distribución de todos los centros a nivel mundial que disponen de dicho Exoesqueleto.

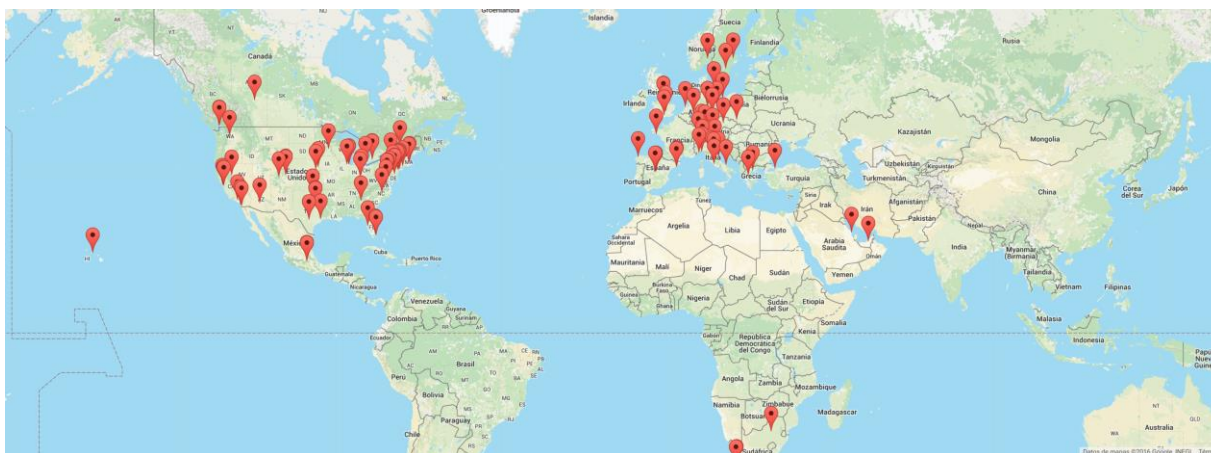


Imagen 6.3: Distribución de centros a nivel mundial que disponen de exoesqueletos de la compañía Ekso-Bionics.

En total son 94 centros repartidos por todo el mundo los que disponen de exoesqueletos de esta compañía. En concreto en España hay 5 centros que poseen un dispositivo de esta compañía, 2 en Madrid, otros 2 en Barcelona y 1 en La Coruña.

Tras ver el éxito de mercado que tienen estos productos y ante su creciente demanda ya que se están obteniendo resultados positivos en su terapia con pacientes, y obteniendo mejoras en el diseño y desarrollo de dicho tipo de dispositivos, son pruebas suficientes para demostrar que con el exoesqueleto planteado en este proyecto existe una oferta de negocio interesante.

Todo esto se ve reforzado de que en el caso del desarrollo de exoesqueletos de las extremidades superiores, se puede decir que estos todavía están en desarrollo, en fase de pruebas, he ahí un dato de gran interés, y una razón de peso para el desarrollo de este proyecto. Por lo tanto este dispositivo tendría opción en el mercado, dedicándose principalmente a vender a centros especializados de Rehabilitación como es el caso que realiza esta empresa.

6.1 Presupuesto.

Puesto que el proyecto no está finalizado completamente no se puede hacer una estimación de la cuantía total que supondría un producto completamente definido. Al decir que no está completamente terminado, se refiere al hecho de que en el presente proyecto se ha realizado un diseño estructural y funcional del dispositivo, pero no se ha realizado el circuito eléctrico y electrónico, ni el desarrollo del software controlador del mismo, ni se han incluido los motores y demás componentes como sensores, cableado y un largo etcétera.

Lo comentado anteriormente es lo que falta de incluir en el dispositivo del exoesqueleto, y es lo que más valor añade al producto, es decir, todos los componentes que faltan, el desarrollo de la comunicación máquina ordenador, el desarrollo e implementación de sensores y otros medidores, los motores... Es la parte sin lugar a dudas de mayor coste del dispositivo.

No obstante al realizar el diseño del dispositivo podemos tener en cuenta el coste de los materiales, y el coste del alquiler de la máquina de mecanizado de nuestras piezas en horas, y en el caso de la Poliamida 2200 también incluye en el precio el tiempo de trabajo y el coste por cm^3 , de esta manera podremos hacer una aproximación de lo que cuesta realizar un prototipo a escala real con dichos materiales. Excluimos del coste del prototipo la mano de obra que supondría realizarlo.

Tabla 6.1: Costes de Materiales y Fabricación.

Tipo de material	Precio Unitario (€)	Unidades o cm3	Coste
Perfiles Tubulares 21,3x2,3 (L=100)	30,1 €	9	270,9 €
Perfiles Cuadrados 30x30x2,6 (L=450)	15,53 €	12	186,36 €
Perfiles Cuadrados 20x20x2 (L=450)	13,47 €	6	80,82 €
Perfiles Rectangulares 50x30x2,6	15,96 €	5	79,8 €
Placas de Aluminio 1060 500x250x5	23,79 €	9	214,11 €
Placas de Aluminio 1060 200x200x40	54,23 €	16	867,68 €
Placas de Aluminio 1060 500x200x3	18,9 €	12	226,8 €
Poliamida PA2200	1,7/cm3 (incluye horas de trabajo)	862,27	1465,859 €
Fibra de Carbono	1,8/cm3	228,82	388,994 €
Alquiler máquina de mecanizado	23€/hora	97 (Horas)	2231 €
		TOTAL	6012,32

El coste de fabricación aproximado asciende a 6000 € puede parecer un poco caro, pero hay que tener en cuenta que primero la fabricación de estas piezas no sigue un estándar, es decir cada pieza de este dispositivo es única, por lo que hay que realizar un mecanizado de cada pieza por separado, y si hablamos de la fabricación de piezas mediante impresión en Poliamida 3D, PA2200 resultan ser caras, pero puesto que es para la fabricación de un prototipo para realizar trabajos futuros y llegar a terminar el dispositivo, es mucho más barato que fabricarlas por inyección ya que para ello habría que fabricar un molde concreto para cada pieza diferente.

Y segundo hay que tener en cuenta que el desarrollo de este tipo de dispositivos no es barato, como mejor ejemplo tenemos el caso descrito anteriormente, de la empresa Ekso-Bionics cuyo exoesqueleto para las extremidades inferiores ascienda a 100.000\$. Por lo tanto con todo lo que queda por incluir en el dispositivo, tenemos margen para poder realizar un dispositivo de un coste bastante menor.

7. TRABAJOS FUTUROS.

Una vez llegados hasta este punto ha quedado claro cuál ha sido el alcance de este proyecto. Al principio en la sección de Objetivos y Especificaciones a desarrollar se ha dejado muy claro que este proyecto iba a tratar del Diseño y desarrollo de un exoesqueleto para las extremidades superiores. El hecho de no poder desarrollar más se debe a la complejidad que este tema conlleva, ya que para una vez que se ha desarrollado el diseño funcional de este exoesqueleto entraría en juego las demás partes del equipo multidisciplinar.

Es por ello que pensando en trabajos futuros a desarrollar sobre este proyecto podemos comentar varios de ellos que se describen a continuación:

1. Admitiendo que el diseño creado en este proyecto es válido, ya que desarrolla una amplia gama de movimientos en torno a los 5 grados de libertad que posee dicho mecanismo. El siguiente y primer paso sería fabricar un prototipo a escala real, para realizar pruebas y los cálculos pertinentes sobre este.
2. El hecho de no realizar cálculos cinemáticos para el desarrollo de este proyecto no tiene otro motivo más que la complejidad que esto suponía. Ya que tenemos 6 ejes de rotación independientes, por lo tanto no era productivo realizar cálculos antes de tener un prototipo de este diseño, ya que existía una gran posibilidad de cometer errores. En experimentos o fases de pruebas de muchos o la mayoría de los dispositivos se aprende más de los ensayos y las pruebas realizadas, que de los posibles cálculos que se hayan podido hacer con anterioridad, es por ello que una vez creado un prototipo del sistema diseñado en este documento, se someta a este a una serie de pruebas, como por ejemplo, introducir el exoesqueleto en un banco de pruebas, analizar este con un equipo especialista en estos temas e incorporar un motor en cada eje de rotación (cada brazo del exoesqueleto tiene 6) con unos sensores y medidores de torque en cada uno de estos, para medir los momentos, los pares cinemáticos y los pares motores que se producen en cada eje de rotación.

3. Una vez realizado todo esto habrá que discutir con el equipo médico/fisioterapeuta sobre posibles mejoras en el dispositivo, es decir si es necesario volver a rediseñar ciertas partes del exoesqueleto, de ser así se variarían los diferentes detalles que así se acordarán y cuando este todo definitivamente correcto se procedería con el desarrollo del sistema eléctrico y electrónico del dispositivo.
4. Mientras el equipo de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos trabajan en sus circuitos, el equipo de Ingeniero Informáticos y de Telecomunicaciones, tendría que encargarse respectivamente, primero de desarrollar un software con los diferentes datos obtenidos de señales electromiográficas de los movimientos del brazo, y segundo desarrollar un sistema de comunicación lógico entre la máquina y un ordenador, para poder ajustar la máquina al gusto del profesional encargado de la rehabilitación de los pacientes.
5. Cuando se haya creado completamente el prototipo, desarrollado completamente la parte mecánica, el desarrollo de la electrónica, los circuitos eléctricos, la informática, los distintos programas/ejercicios a realizar por el exoesqueleto (Dicha información se la mandará el PC conectado a este dispositivo), y la comunicación entre Computadora dispositivo (Exoesqueleto), entraríamos en la fase de experimentación real con pacientes.

8. CONCLUSIONES.

Conforme a los objetivos principales marcados al principio de esta memoria, los cuales eran:

1. Diseño de un Exoesqueleto funcional para la rehabilitación de las extremidades superiores.
2. Estudio de dimensiones anatómicas, para un correcto diseño de la estructura final.
3. Dispositivo adaptable (en cierta medida) a distintos tipos de usuarios.
4. Funcionabilidad del dispositivo con varios grados de libertad. Como dato el brazo humano posee 7 grados de libertad independientes, en este dispositivo se consigue lograr 5 grados de libertad.
5. Diseño ergonómico.
6. Desarrollo de piezas que no causen posibles daños en el usuario final.
7. Elección de materiales correctos en el desarrollo de las piezas. Dichos materiales deberán de ser ligeros, para que la estructura del exoesqueleto no sea pesada.

Podemos acabar la elaboración de esta memoria con las siguientes conclusiones al respecto:

- El objetivo principal el cual era el diseño y desarrollo de un Exoesqueleto para la rehabilitación de las extremidades superiores se ha logrado con éxito.
- De ello podemos analizar varios aspectos, cómo es la difícil tarea de realizar un diseño funcional de un dispositivo de este estilo. Ya que en esta tarea se reúnen varios problemas; Primero realizar un dispositivo conforme al estándar de medidas del cuerpo humano; Segundo, analizar todos los grados de libertad que posee la extremidad superior del cuerpo humano, y tras ello vimos que era una tarea muy complicada de desarrollar los 7 grados de libertad independientes que tiene la extremidad del cuerpo humano. Es por esto que me reuní con un profesor de fisioterapia de este campus para tratar de simplificar este factor, y reducir los grados de libertad hasta conseguir que con ese número de grados de libertad se cubrieran la mayoría de los movimientos a realizar en una terapia de rehabilitación normal para este tipo de casos.

- Tras esto, el número de grados de libertad a desarrollar en este dispositivo fueron 5, haciéndonos la tarea de diseño muchísimo más fácil, y por supuesto este objetivo se realizó con éxito.
- Además, la posible recuperación del paciente, en muy pocos casos con este nivel de gravedad será al 100%, por esto mismo, los movimientos a realizar por el exoesqueleto no es estrictamente necesario que se desarrollen al 100% de su amplitud, sino que bastaría con que el exoesqueleto realice los movimientos dentro del posible rango de recuperación de movilidad, definidos a la perfección. No obstante, el diseño funcional de este dispositivo permite llegar más allá de los movimientos dentro del rango de recuperación de movilidad, siendo esto un aspecto muy positivo en el diseño y funcionalidad de este.
- En el dispositivo se incorporan una serie de pequeñas modificaciones que permiten que este sea adaptable a distintas medidas de distintas personas, no siendo este pues un único dispositivo para una determinada persona, sino que se podría adaptar a cierto número de personas.
- Está claro que una de las posibles mejoras en cuanto a lo comentado anteriormente es crear/rediseñar una serie de adaptaciones que lleven un menor tiempo llevarlas a cabo, e incluso crear otras para poder abarcar un mayor número de posibles usuarios.
- El dispositivo exoesqueleto se ha desarrollado cuidadosamente, para aparte de conseguir que este sea funcional, sea estéticamente atractivo dentro de la medida de lo posible, sea un diseño ergonómico y cómodo de usar, y por supuesto que la morfología se adapte perfectamente al usuario de ahí (Desarrollo de un Exoesqueleto antropomórfico para la rehabilitación de las extremidades superiores) y que las piezas de este no cause ningún posible daño en el paciente.
- Se ha desarrollado un diseño con materiales ligeros, siendo el peso total del brazo de 6,9 Kg (Sólo de materiales, faltan motores cableado, sensores y circuitos).

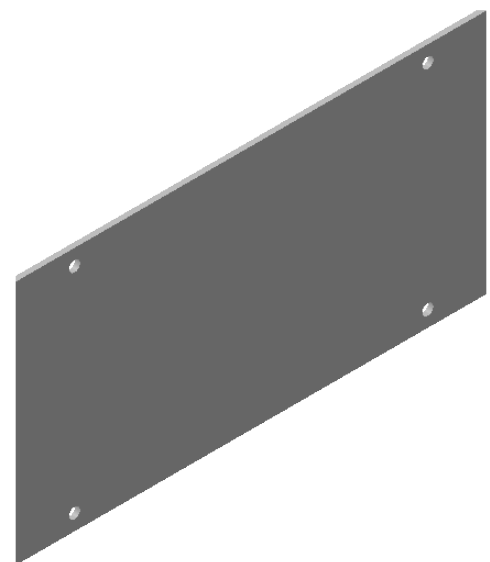
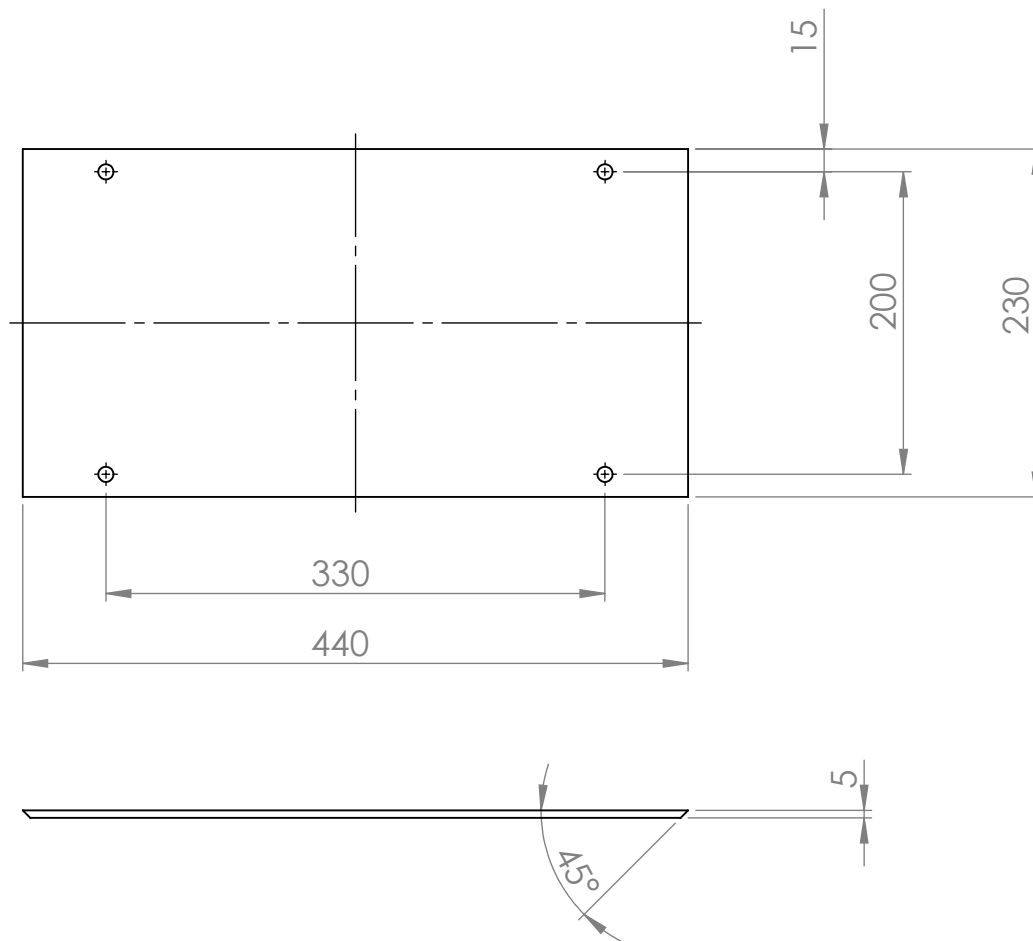
- A pesar de que este proyecto abarca desarrollar una solución a un problema existente a través del diseño de un dispositivo, podemos concluir que existe un acercamiento a un dispositivo final inmediato ya que de los objetivos planteados inicialmente se cumplen todos. De esta manera pues, el siguiente paso construir un prototipo, realizar pruebas en él y realizar ciertos cambios en el caso de ser necesarios estos.


BIBLIOIGRAFÍA

- (INE), I. n. (Octubre de 2009). *INE*. Recuperado el Marzo de 2016, de <http://www.ine.es/revistas/cifraire/1009.pdf>
- (INE), I. N. (20 de Mayo de 2015). *INE*. Obtenido de <http://www.servimedia.es/noticias/detalle.aspx?s=23&n=422899>
- ¿Qué es y cómo funciona el exoesqueleto?* (s.f.). Obtenido de <http://www.24-horas.mx/que-es-y-como-funciona-el-exoesqueleto/>
- Burgos, D. A., Grosso, J., Chio, N., & Anaya, M. (2009). Diseño de un exoesqueleto mecatrónico de brazo basado en screws y robots paralelos. *Conference: 2do Congreso Internacional de Ingeniería Mecatrónica, At Bucaramanga, Colombia, Volume: 1*, (pág. 9).
- Ciencias, S. y. (s.f.). *La robótica y su aplicación en terapias de rehabilitación*. Obtenido de <http://saberesyciencias.com.mx/2015/04/06/la-robotica-y-su-aplicacion-en-terapias-de-rehabilitacion/>
- Constantinescu, C., Popescu, D., Muresan, P.-C., & Stana, S.-I. (s.f.). Exoskeleton-centered Process Optimization in Advanced Factory Environments. *Procedia CIRP*, 740-745. Obtenido de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827115011300>
- Exoesqueletos para potenciar las capacidades humanas y apoyar la rehabilitación*. (s.f.). Obtenido de http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:http://www.scielo.org.co/pdf/rinbi/v4n7/v4n7a08.pdf&gws_rd=cr&ei=j2D5VsPmAab76AT4m5HoBQ
- futuro, E. (s.f.). *La robótica avanza para mejorar la rehabilitación de discapacitados*. Obtenido de <http://www.efefuturo.com/noticia/la-robotica-avanza-para-mejorar-la-rehabilitacion-de-discapacitados/>
- Gopura, R. A., & Kiguchi, K. (s.f.). Development of a 6DOF Exoskeleton Robot for Human Upper-Limb Motion Assist. *4th International Conference on Information and Automation for Sustainability, 2008. ICIAFS 2008* (págs. 13-18). IEEE Xplore. doi:10.1109/ICIAFS.2008.4783986
- He, J., Koeneman, E. J., Schultz, R., Huang, H., Wanberg, J., Herring, D. E., & Sugar, T. (2005). Design of a robotic upper extremity repetitive therapy device. *9th International Conference on Rehabilitation Robotics, 2005. ICORR 2005* (págs. 95-98). IEEE Xplore.
- Kiguchi, K., Kado, K., & Hayashi, Y. (2011). 2011 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO). (págs. 2937-2942). IEEE Xplore.
- Kiguchi, K., Rahman, M. H., Sasaki, M., & Teramoto, K. (2008). Development of a 3DOF mobile exoskeleton robot for human upper-limb motion assist. *Robotics and Autonomous Systems*, 678-691. Obtenido de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921889007001716>
- Koo, D., Sohn, M., & Shin, J. h. (2011). 2011 IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR). (págs. 1-6). IEEE Xplore.

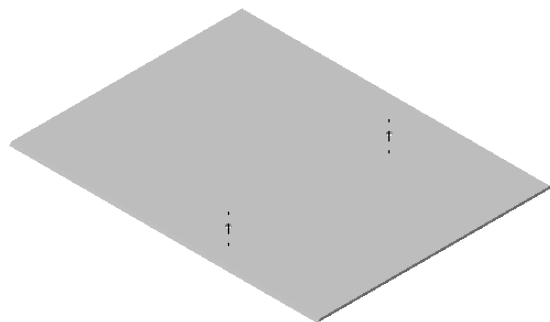
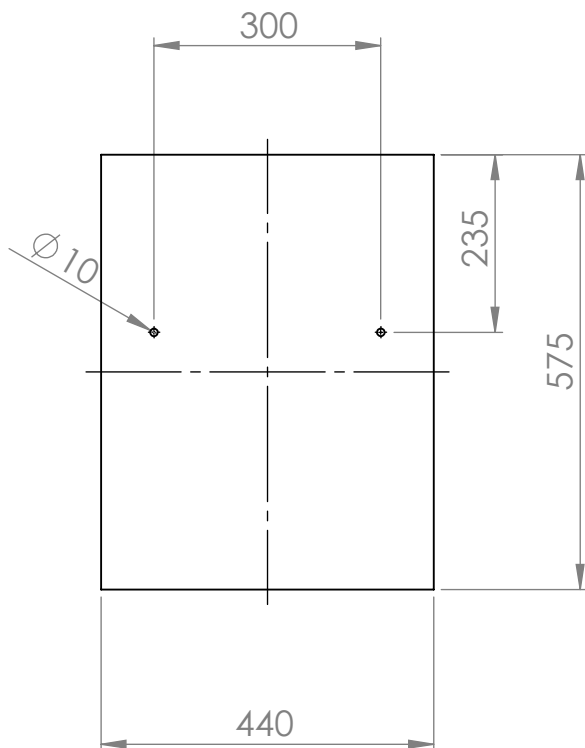
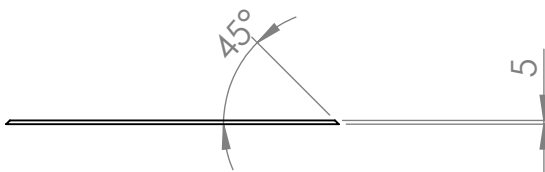
- La robótica avanza para mejorar la rehabilitación de discapacitados.* (s.f.). Obtenido de <http://www.efefuturo.com/noticia/la-robotica-avanza-para-mejorar-la-rehabilitacion-de-discapacitados/>
- Lugo, E., Ponce, P., Molina, A., & Castro, S. (2014). Co-simulación del Diseño Biomecánico para un Exoesqueleto Robótico del Miembro Inferior. *Revista mexicana de ingeniería biomédica*, 143-156.
- Magjarevic, R., Müller-Karger, C., Wong, S., La Cruz, A., Gutiérrez Carvajal, R. E., Vanegas, F., . . . Niño, P. (s.f.). Diseño y Control de un Exoesqueleto para Rehabilitación Motora en Miembro Superior. En *IV Latin American Congress on Biomedical Engineering 2007, Bioengineering Solutions for Latin America Health*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. Obtenido de http://link.springer.com/10.1007/978-3-540-74471-9_176
- Neckel, N., Wisman, W., & Hidler, J. (2006). Limb Alignment and Kinematics Inside a Lokomat Robotic Orthosis. *28th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, 2006. EMBS '06*, (págs. 2698-2701). doi:10.1109/IEMBS.2006.259970
- Nef, T., Riener, R., Müri, R., & Mosimann, U. P. (2013). Medical & Biological Engineering & Computing. 781-789.
- País, E. E. (s.f.). *Un exoesqueleto para levantar peso*. Obtenido de http://elpais.com/elpais/2016/01/29/ciencia/1454082741_918903.html
- Perry, J., Rosen, J., & Burns, S. (s.f.). Upper-Limb Powered Exoskeleton Design. 408-417. doi:10.1109/TMECH.2007.901934
- Sociales, M. d. (s.f.). Obtenido de <http://sid.usal.es/idocs/F8/8.1-6367/8.1-6367.pdf>
- Stienen, A. H., Hekman, E. E., Helm, F. C., & Prange, G. B. (2007). IEEE 10th International Conference on Rehabilitation Robotics, 2007. ICORR 2007. (págs. 820-826). IEEE Xplore.
- What is a parallel robot?* (s.f.). Obtenido de <http://www.mecademic.com/What-is-a-parallel-robot.html>


ANEXOS.

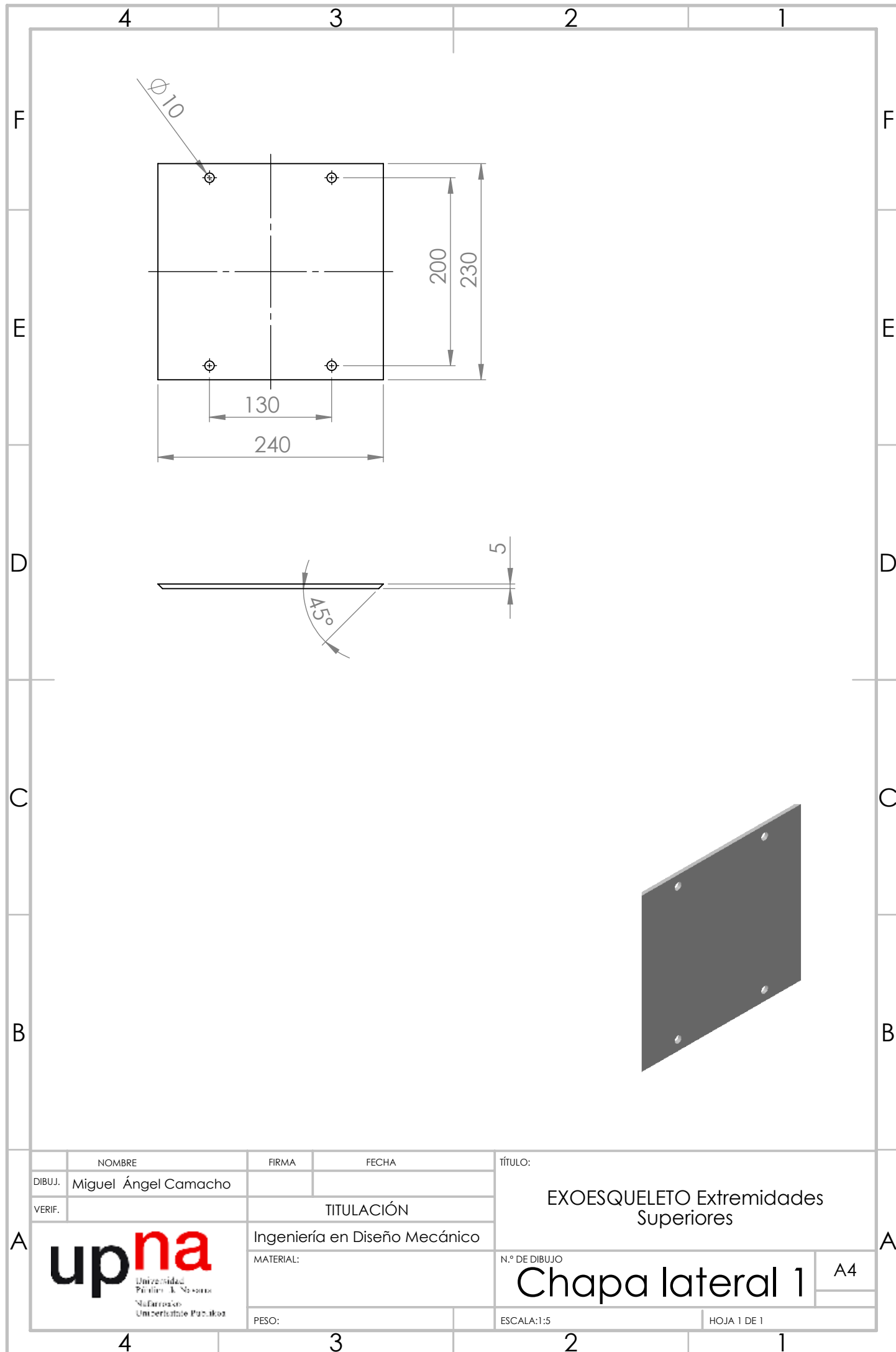



NOMBRE		FIRMA	FECHA	TÍTULO:	
DIBUJ.	Miguel Ángel Camacho			EXOESQUELETO Extremidades Superiores	
VERIF.		TITULACIÓN			
 <p>Universidad Pública de Navarra Unibertsitatea Publikoa</p>		Ingeniería en Diseño Mecánico		N.º DE DIBUJO Chapa Frontal 1	
		MATERIAL:			
		PESO:		ESCALA: 1:5	

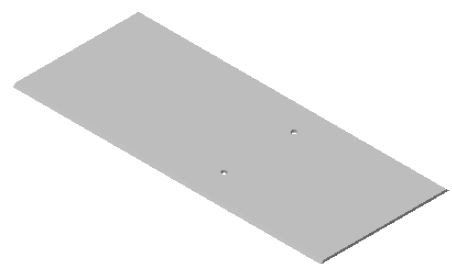
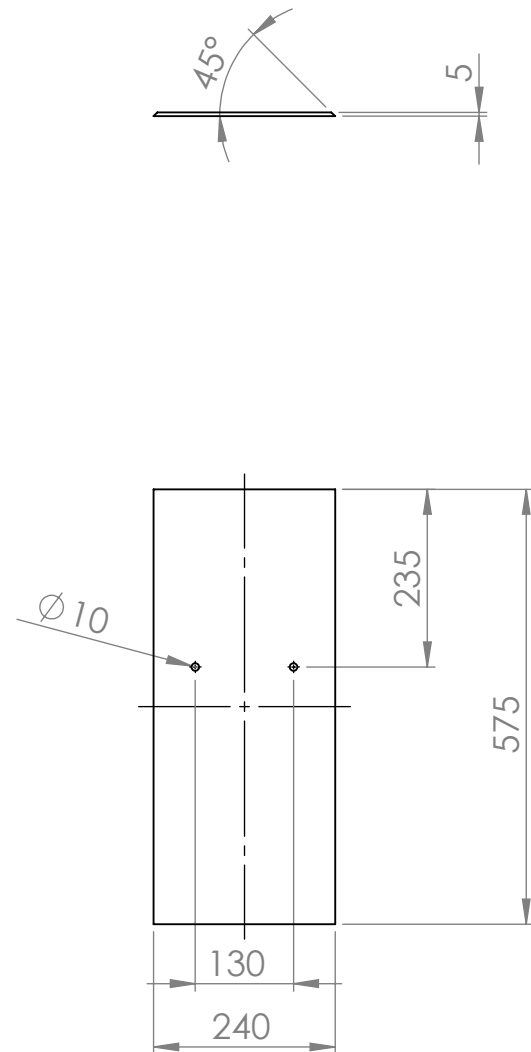
A4




	NOMBRE	FIRMA	FECHA	TÍTULO:
DIBUJ.	Miguel Ángel Camacho			EXOESQUELETO Extremidades Superiores
VERIF.		TITULACIÓN		
A	 <p>Universidad Pública de Navarra Unibertsitatea Puzoskora</p>		Ingeniería en Diseño Mecánico	
			MATERIAL:	
			PESO:	
		N.º DE DIBUJO		A4
		Chapa Frontal 2		
		ESCALA: 1:10		HOJA 1 DE 1

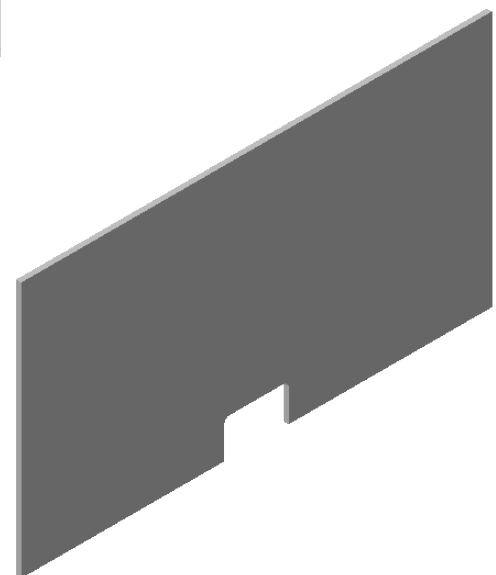
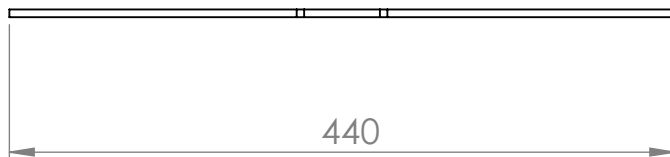
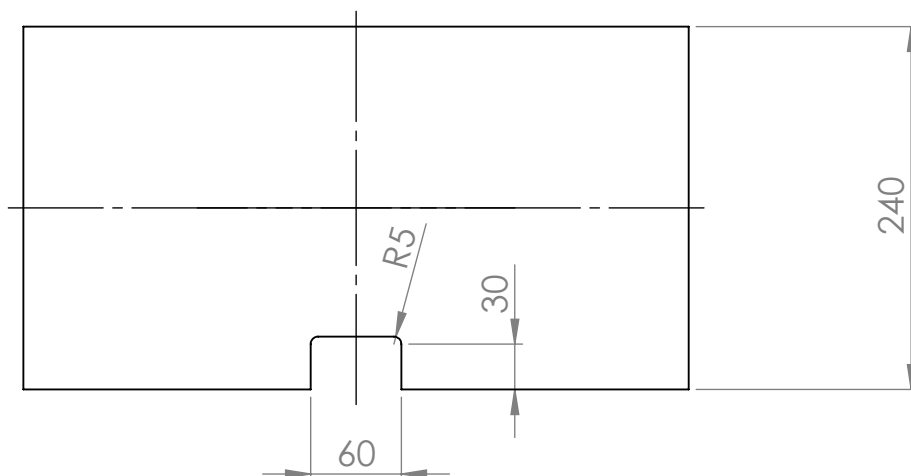



	NOMBRE	FIRMA	FECHA	TÍTULO:
DIBUJ.	Miguel Ángel Camacho			EXOESQUELETO Extremidades Superiores
VERIF.		TITULACIÓN		
A	 Universidad Pública de Navarra Unibertsitatea Puzazkora	Ingeniería en Diseño Mecánico		N.º DE DIBUJO Chapa lateral 1
		MATERIAL:		
		PESO:		ESCALA: 1:5

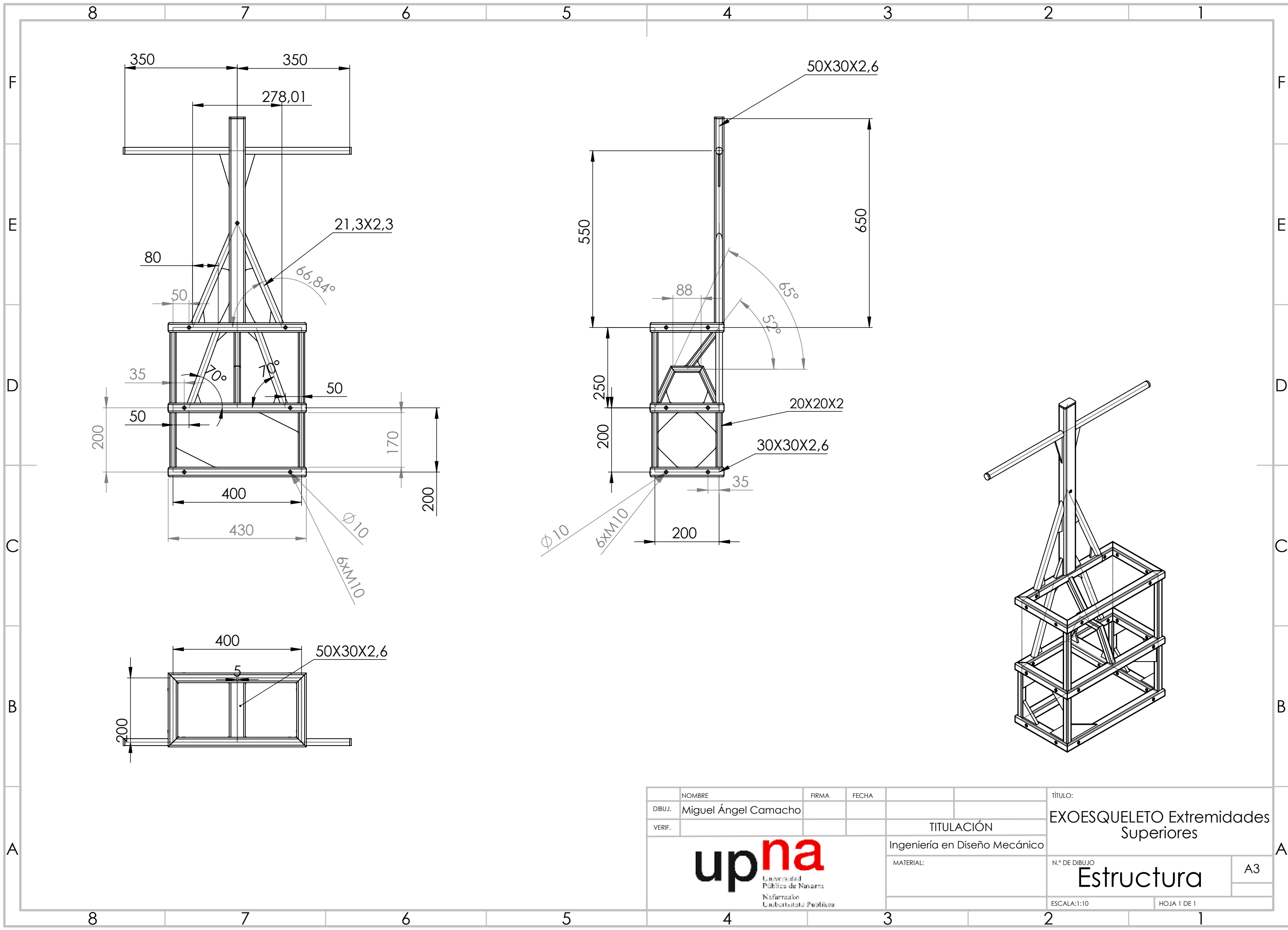


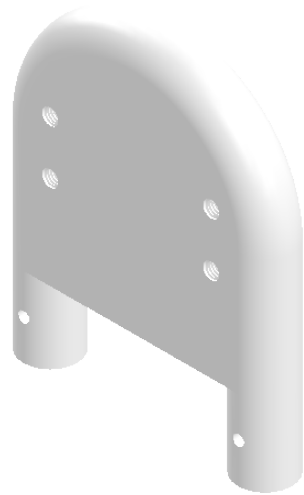
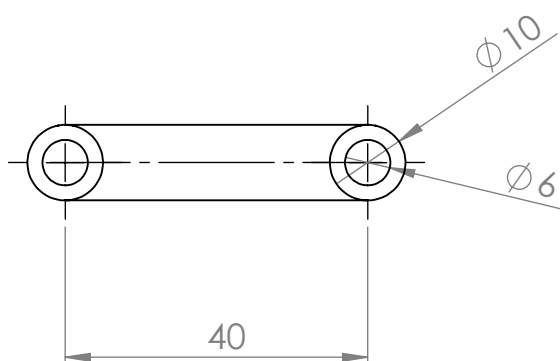
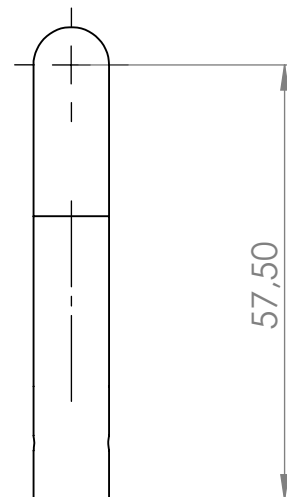
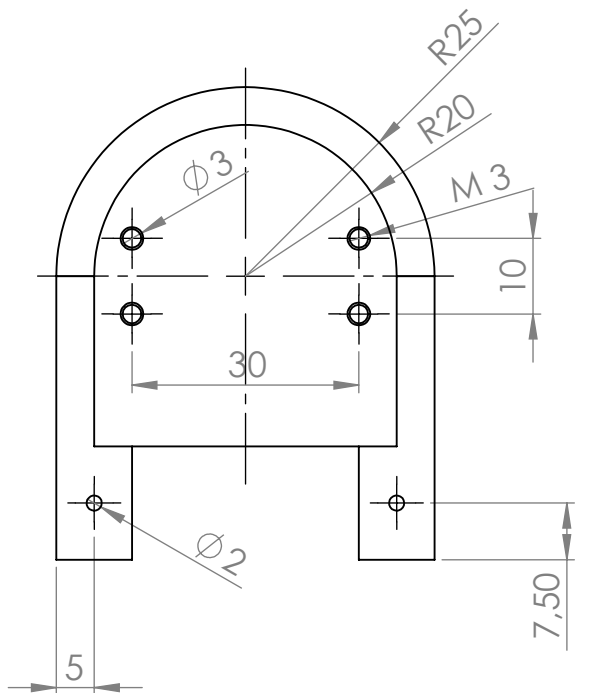
NOMBRE		FIRMA	FECHA	TÍTULO:	
DIBUJ.	Miguel Ángel Camacho			EXOESQUELETO Extremidades Superiores	
VERIF.		TITULACIÓN			
 <p>Universidad Pública de Navarra Unibertsitatea Puzuzkoa</p>		Ingeniería en Diseño Mecánico		N.º DE DIBUJO Chapa lateral 2	
		MATERIAL:			
		PESO:		ESCALA: 1:10	

A4

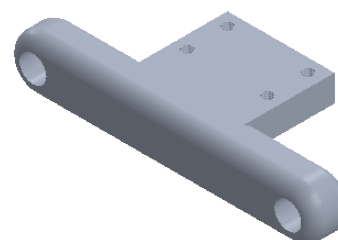
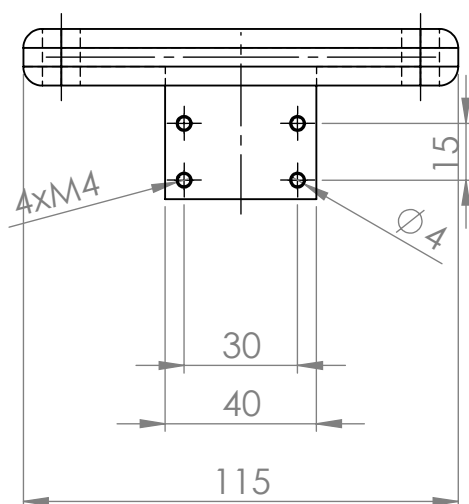
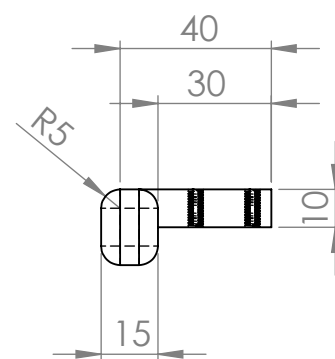
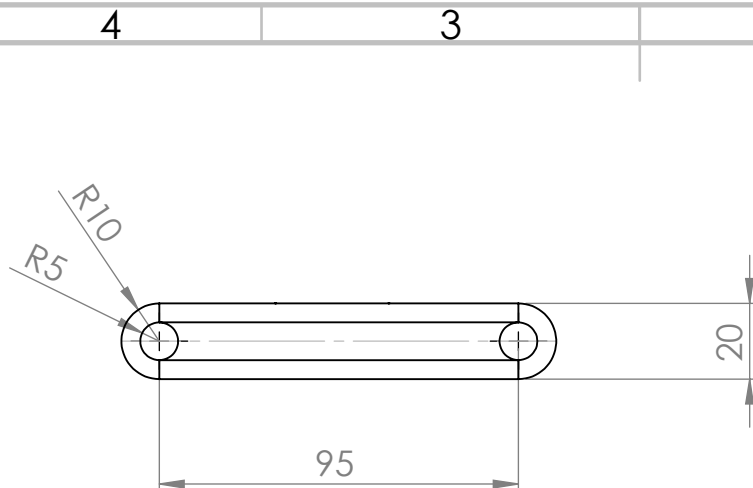



	NOMBRE	FIRMA	FECHA	TÍTULO:
DIBUJ.	Miguel Ángel Camacho			EXOESQUELETO Extremidades Superiores
VERIF.		TITULACIÓN		
A			Ingeniería en Diseño Mecánico	
			MATERIAL:	
			PESO:	
			N.º DE DIBUJO	A4
			Chapa Superior	
			ESCALA:1:5	HOJA 1 DE 1



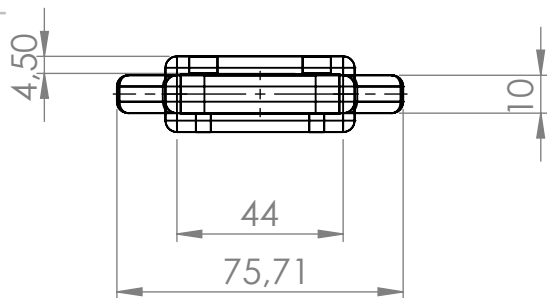
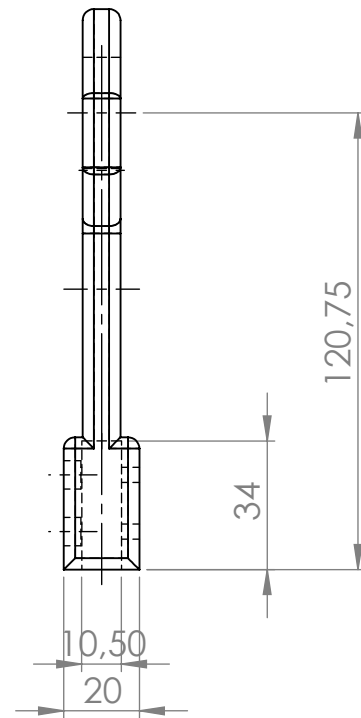
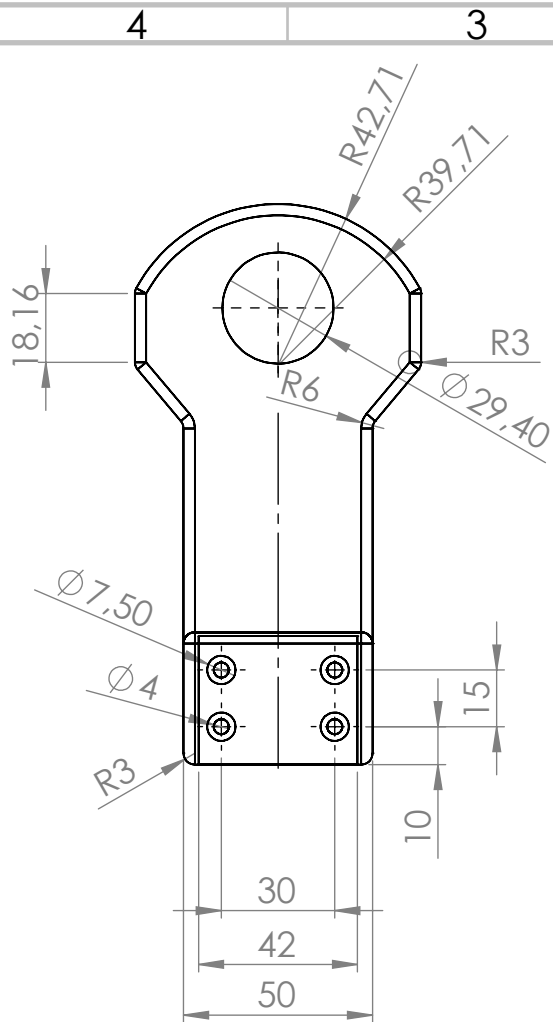


NOMBRE		FIRMA		FECHA		TÍTULO:	
DIBUJ.	Miguel Ángel Camacho					EXOESQUELETO Extremidades Superiores	
VERIF.							
		TITULACIÓN		N.º DE DIBUJO		A4	
		Ingeniería en Diseño Mecánico		Abrazadera			
		MATERIAL:		ESCALA:1:1		HOJA 1 DE 1	
Pieza 1 de 12							

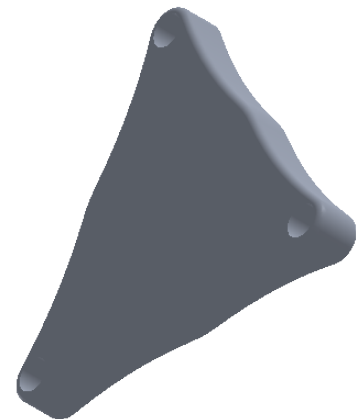
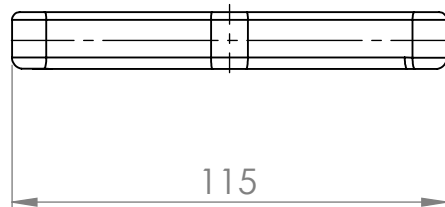
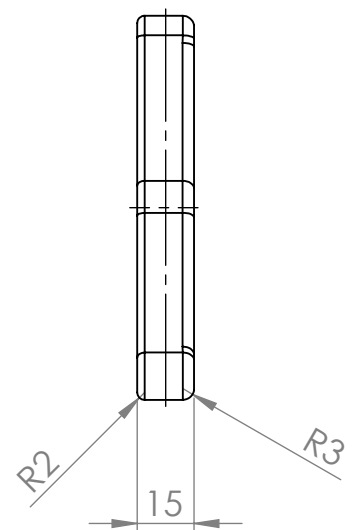
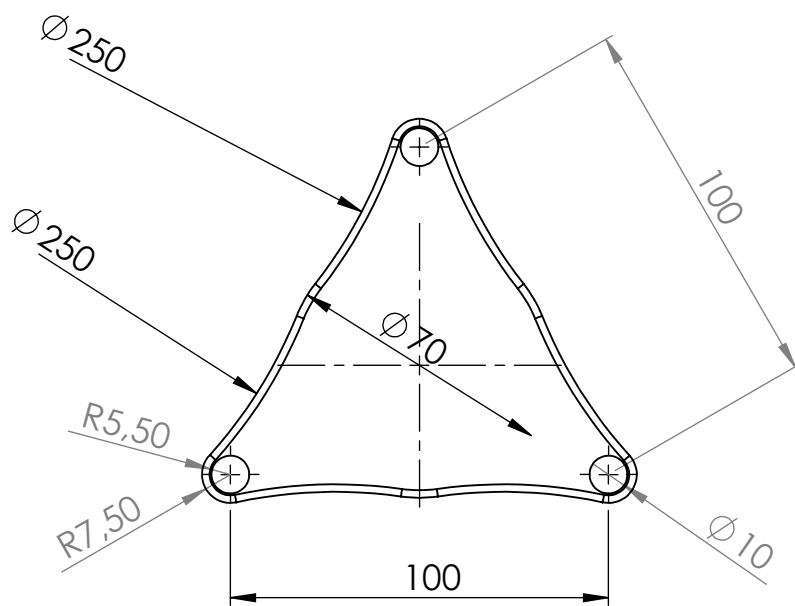



NOMBRE		FIRMA	FECHA	TÍTULO:	
DIBUJ.	Miguel Ángel Camacho			EXOSQUELETO Extremidades Superiores	
VERIF.		TITULACIÓN			
		Ingeniería en Diseño Mecánico		N.º DE DIBUJO	
		MATERIAL:		A4	
		Pieza 2 de 12		ESCALA: 1:2	
				HOJA 1 DE 1	

Agarre Unión 2 guías

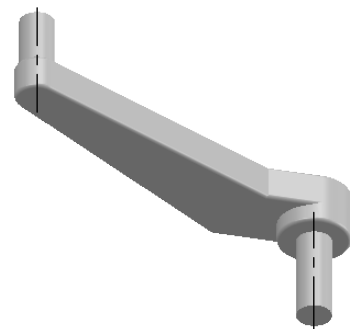
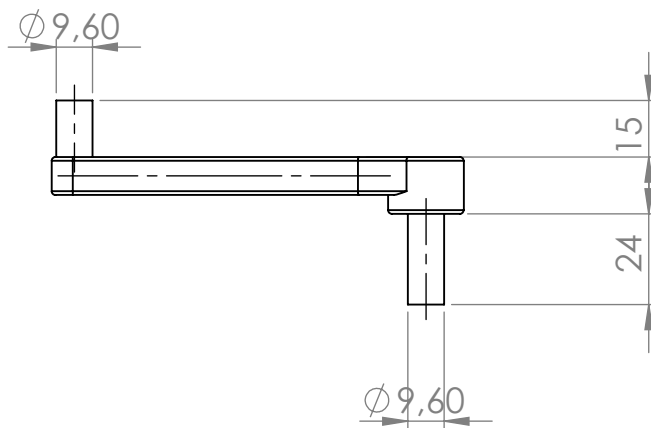
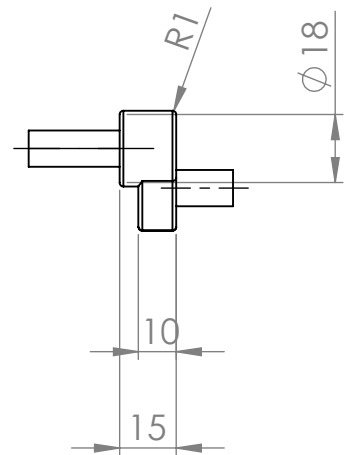
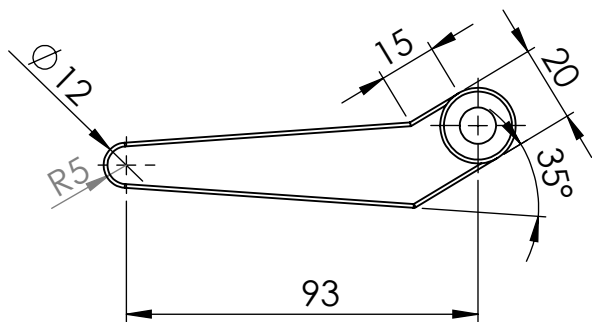



NOMBRE		FIRMA		FECHA		TÍTULO:	
DIBUJ. Miguel Ángel Camacho						EXOESQUELETO Extremidades Superiores	
VERIF.							
		TITULACIÓN					
		Ingeniería en Diseño Mecánico					
		MATERIAL:		N.º DE DIBUJO		A4	
		Pieza 3 de 12		ESCALA:1:2		HOJA 1 DE 1	



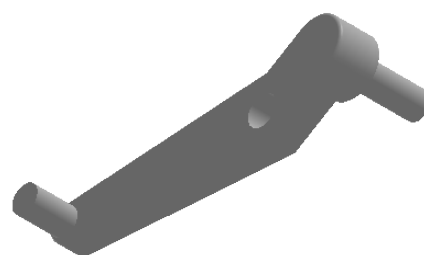
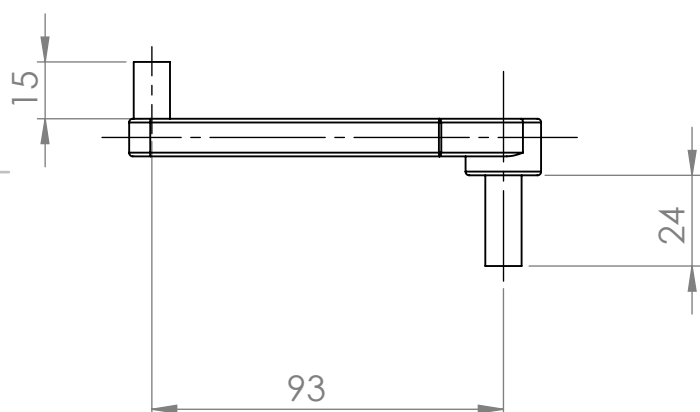
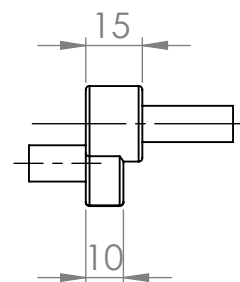
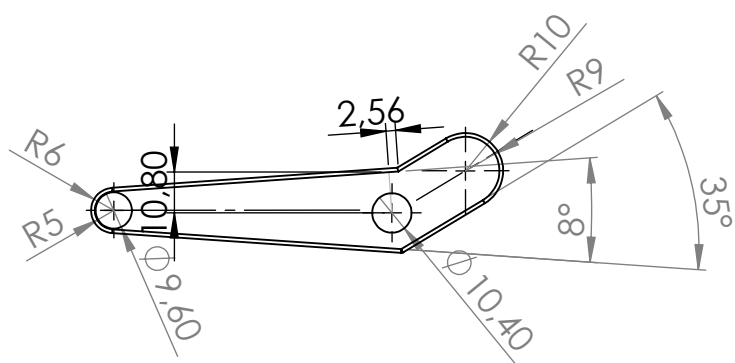
NOMBRE		FIRMA	FECHA	TÍTULO:	
DIBUJ.	Miguel Ángel Camacho			EXOESQUELETO Extremidades Superiores	
VERIF.		TITULACIÓN			
 <p>Universidad Pública de Navarra Universidad Pública</p>		Ingeniería en Diseño Mecánico		N.º DE DIBUJO Base Triangular	
		MATERIAL:			
		Pieza 4 de 12		ESCALA: 1:2	


A4



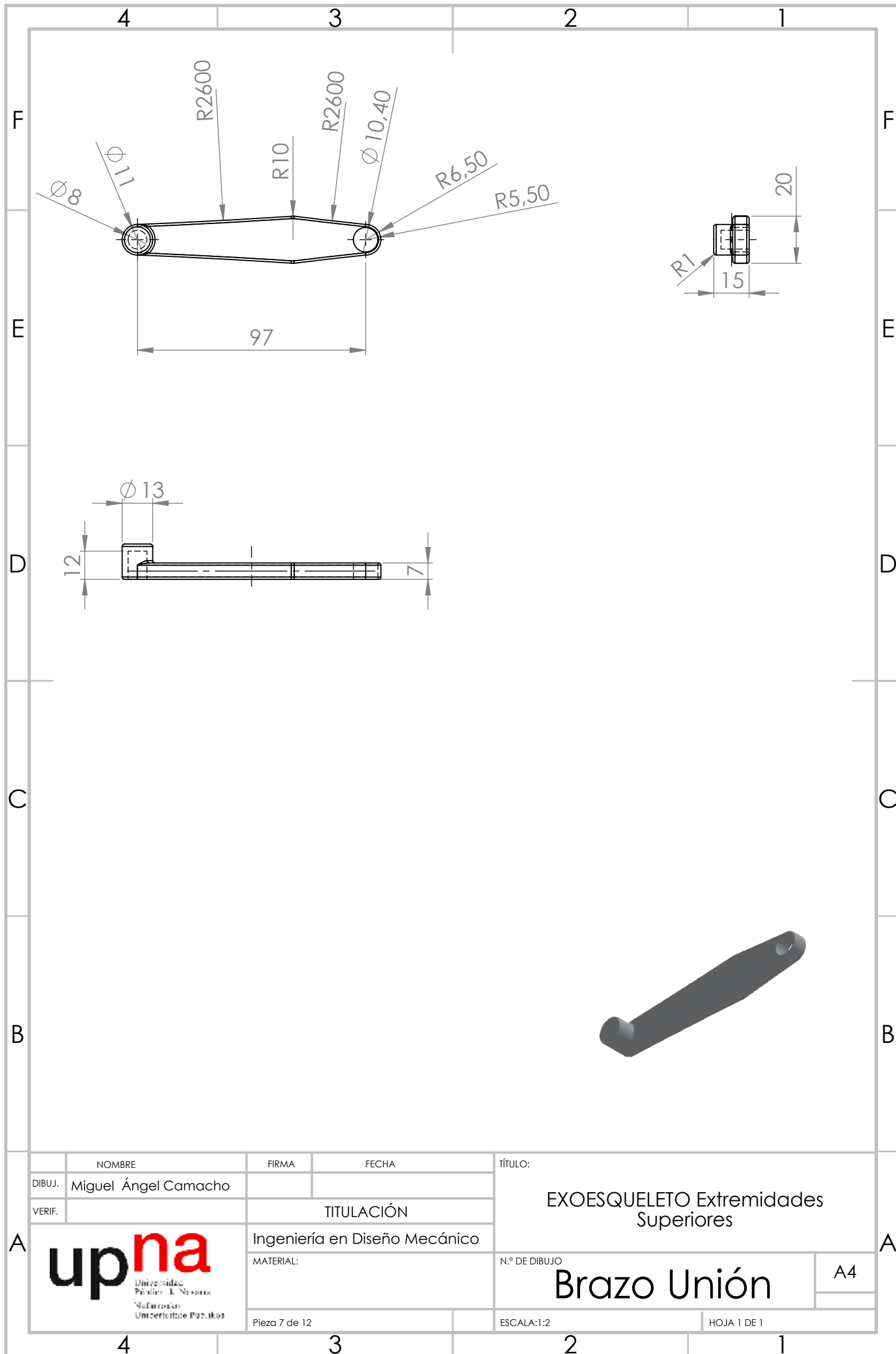
NOMBRE		FIRMA	FECHA	TÍTULO:	
DIBUJ.	Miguel Ángel Camacho			EXOESQUELETO Extremidades Superiores	
VERIF.		TITULACIÓN			
		Ingeniería en Diseño Mecánico		N.º DE DIBUJO Brazo Articulado Drch	
		MATERIAL:			
		Pieza 5 de 12		ESCALA: 1:2	

A4

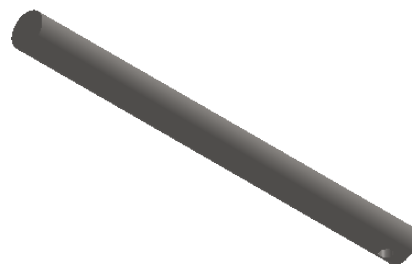
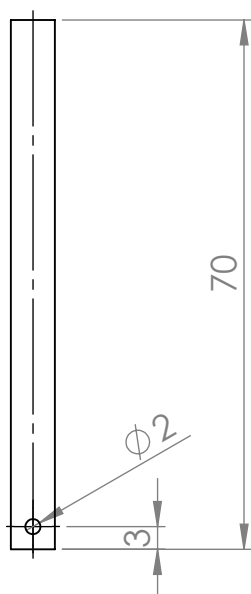
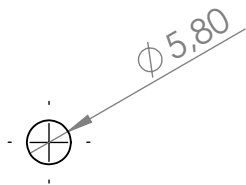


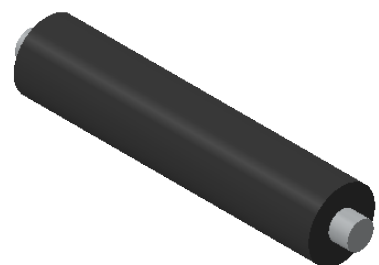
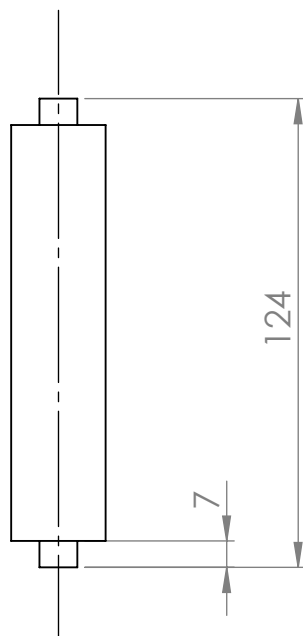
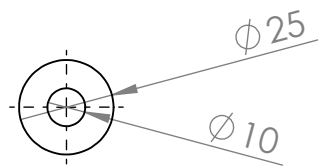
NOMBRE		FIRMA	FECHA	TÍTULO:	
DIBUJ.	Miguel Ángel Camacho			EXOESQUELETO Extremidades Superiores	
VERIF.		TITULACIÓN			
		Ingeniería en Diseño Mecánico		N.º DE DIBUJO	
		MATERIAL:		Brazo Articulado Izq	
		Pieza 6 de 12		ESCALA: 1:2	HOJA 1 DE 1


A4

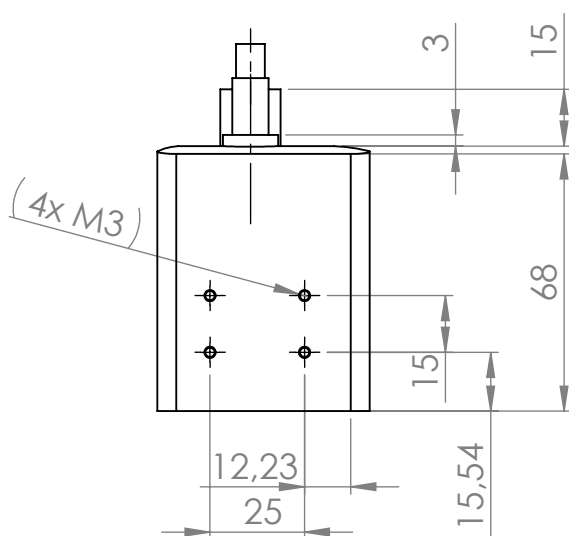
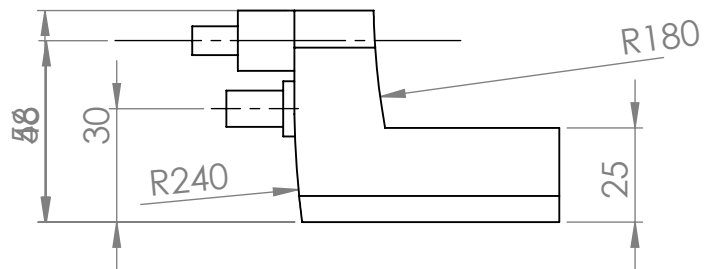
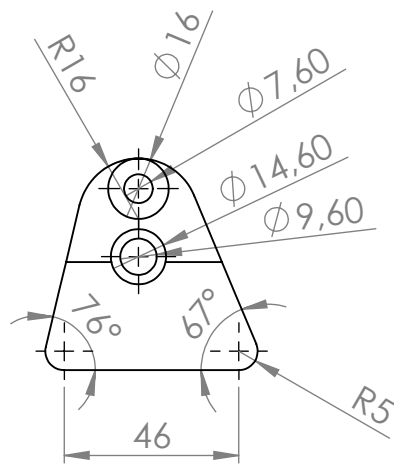



	4	3	2	1	
F					F
E					E
D					D
C					C
B					B
A					A
	NOMBRE		FIRMA	FECHA	TÍTULO:
DIBUJ.	Miguel Ángel Camacho				EXOESQUELETO Extremidades Superiores
VERIF.			TITULACIÓN		
	upna		Ingeniería en Diseño Mecánico		N.º DE DIBUJO
	Universidad Pública de Navarra Unibertsitatea Publikoa		MATERIAL:		
	Pieza 8 de 12		ESCALA:1:1		HOJA 1 DE 1
	4	3	2	1	



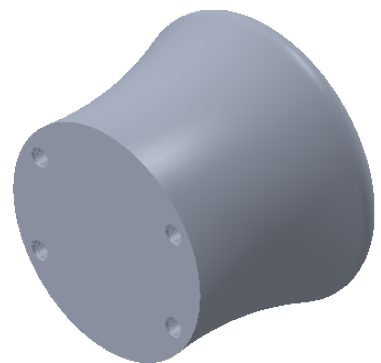
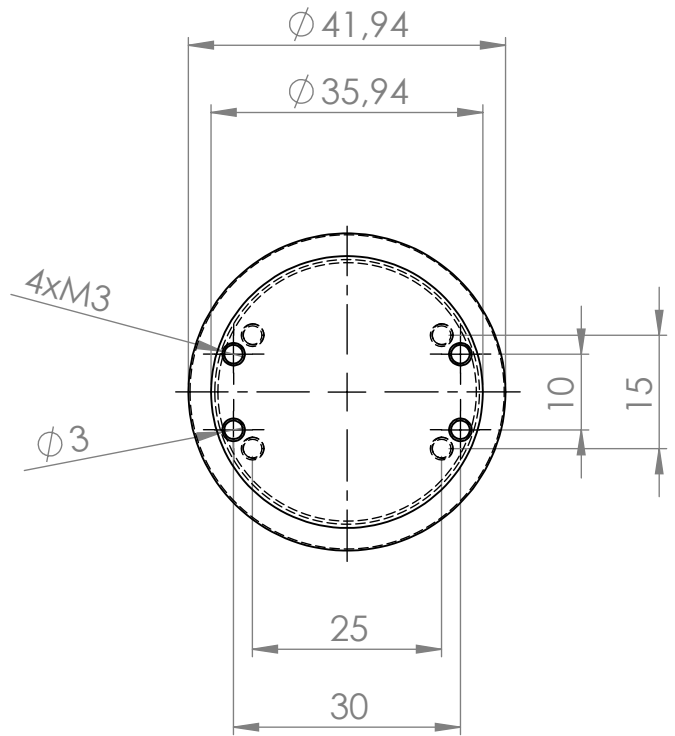
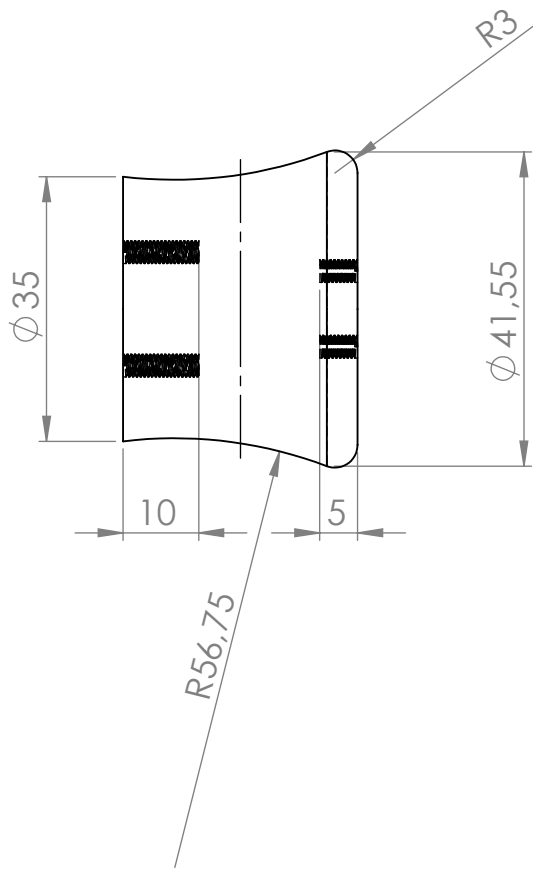


NOMBRE		FIRMA	FECHA	TÍTULO:	
DIBUJ.	Miguel Ángel Camacho			EXOESQUELETO Extremidades Superiores	
VERIF.		TITULACIÓN			
 <p>Universidad Pública de Navarra Unibertsitatea Puzuzkoa</p>		Ingeniería en Diseño Mecánico		N.º DE DIBUJO	A4
		MATERIAL:		Manguito	
		Pieza 9 de 12		ESCALA:1:2	HOJA 1 DE 1



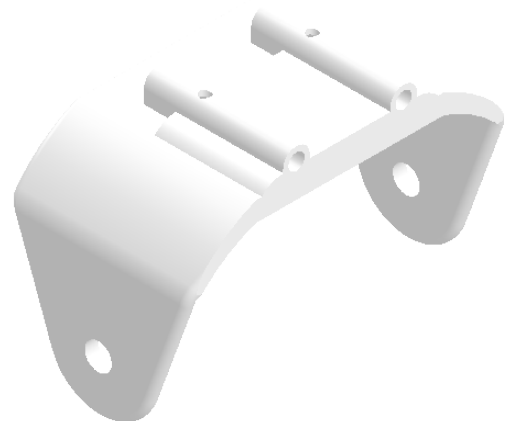
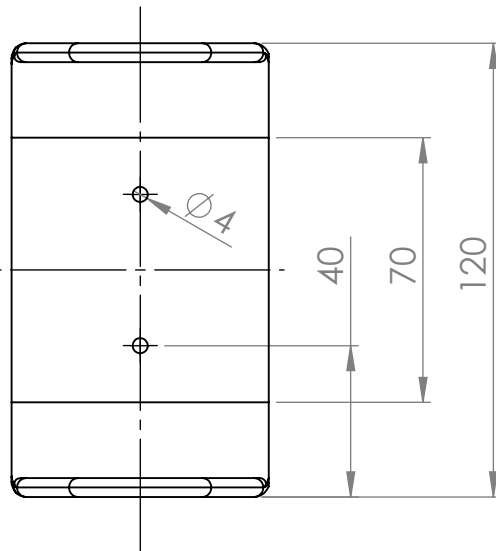
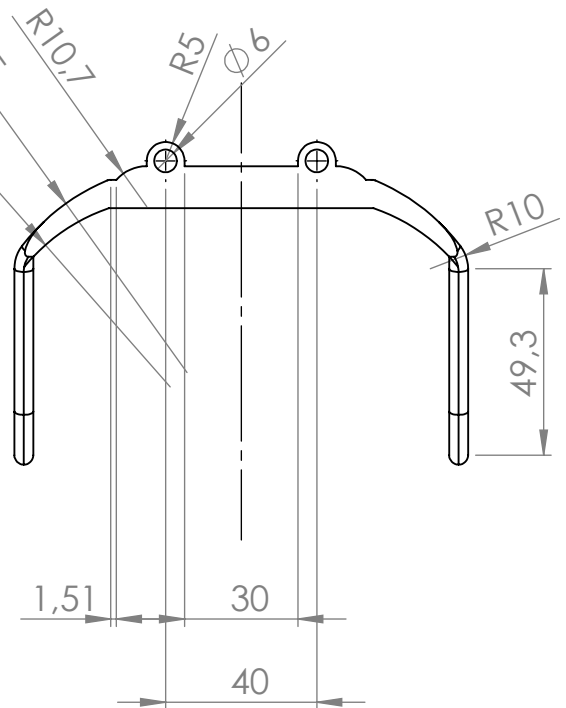
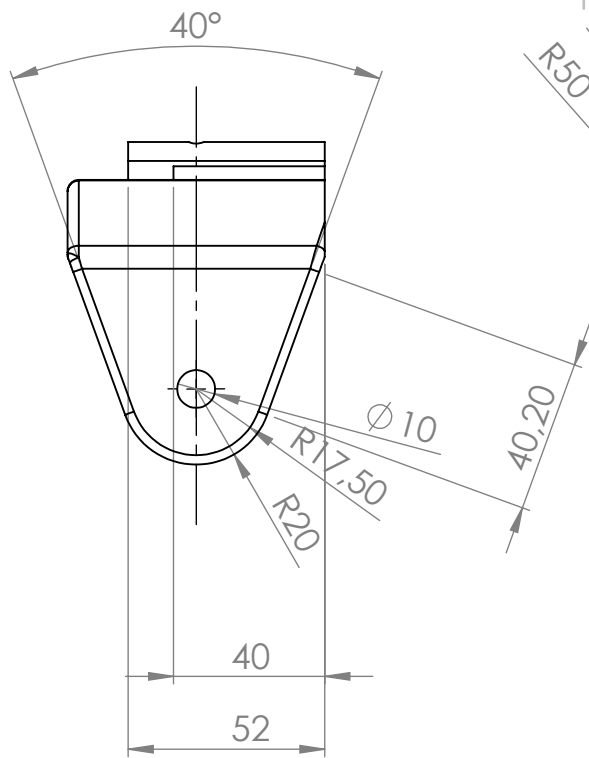
NOMBRE		FIRMA	FECHA	TÍTULO:	
DIBUJ.	Miguel Ángel Camacho			EXOESQUELETO Extremidades Superiores	
VERIF.		TITULACIÓN			
 <p>Universidad Politécnica Nacional Núcleo Universitario Pucallpa</p>		Ingeniería en Diseño Mecánico		N.º DE DIBUJO	
		MATERIAL:		Pieza Muñeca Carbon Fiber	
		Pieza 10 de 12		ESCALA: 1:2	


A4



NOMBRE		FIRMA	FECHA	TÍTULO:	
DIBUJ.	Miguel Ángel Camacho			EXOSQUELETO Extremidades Superiores	
VERIF.		TITULACIÓN			
upna		Ingeniería en Diseño Mecánico		N.º DE DIBUJO	
Universidad Pública de Navarra		MATERIAL:		Pieza Unión Muñeca	
Universidad Pública de Navarra		Pieza 11 de 12		ESCALA:1:1	
				HOJA 1 DE 1	

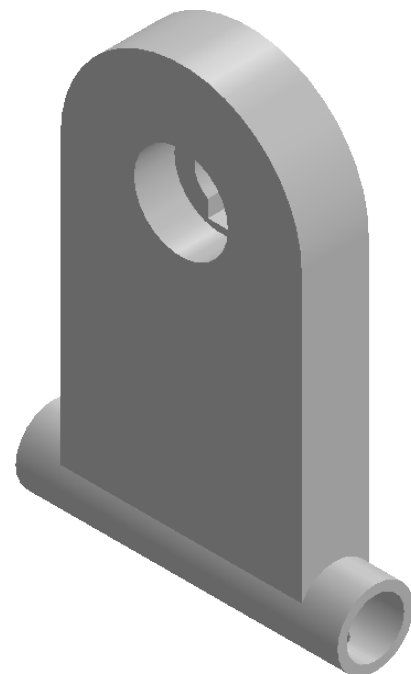
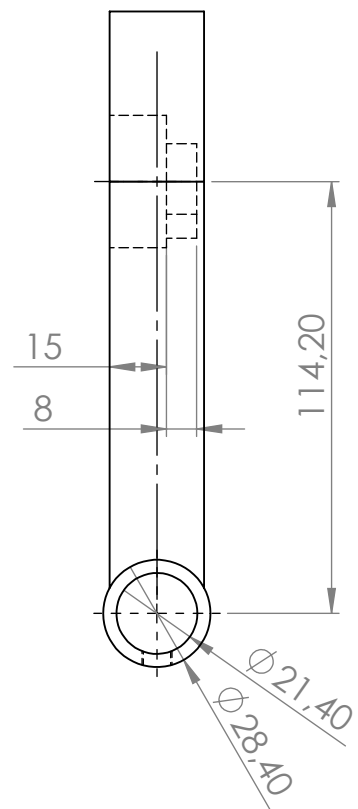
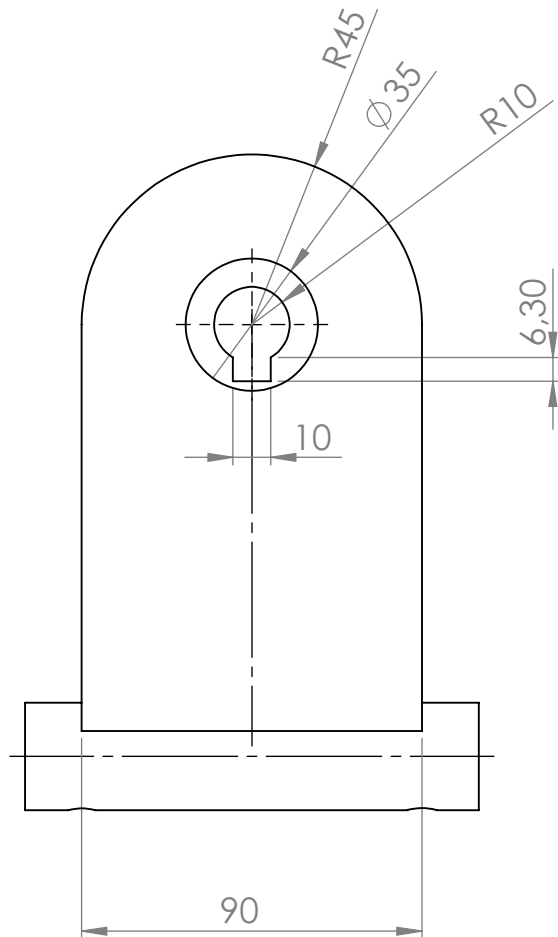
A4




NOMBRE		FIRMA	FECHA	TÍTULO:	
DIBUJ.	Miguel Ángel Camacho			EXOSQUELETO Extremidades Superiores	
VERIF.		TITULACIÓN			
 <p>Universidad Politécnica Nacional Núcleo de Ingeniería Mecánica</p>		Ingeniería en Diseño Mecánico		N.º DE DIBUJO	
		MATERIAL:			
		Pieza 12 de 12		ESCALA:1:2	

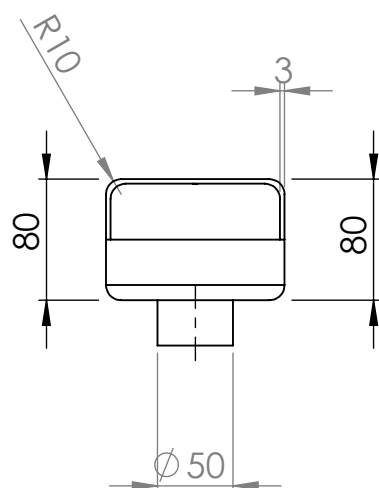
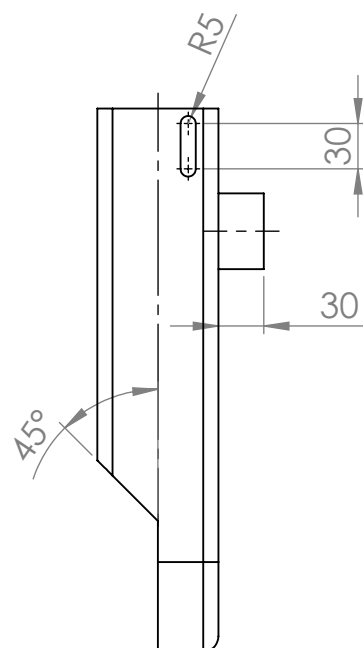
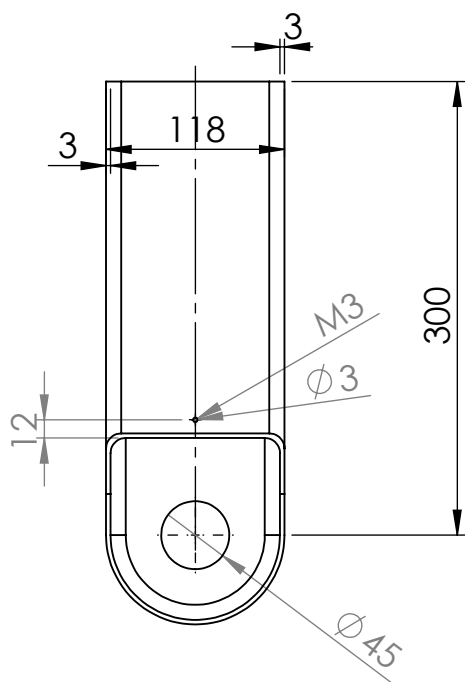
Protector Manguito


A4



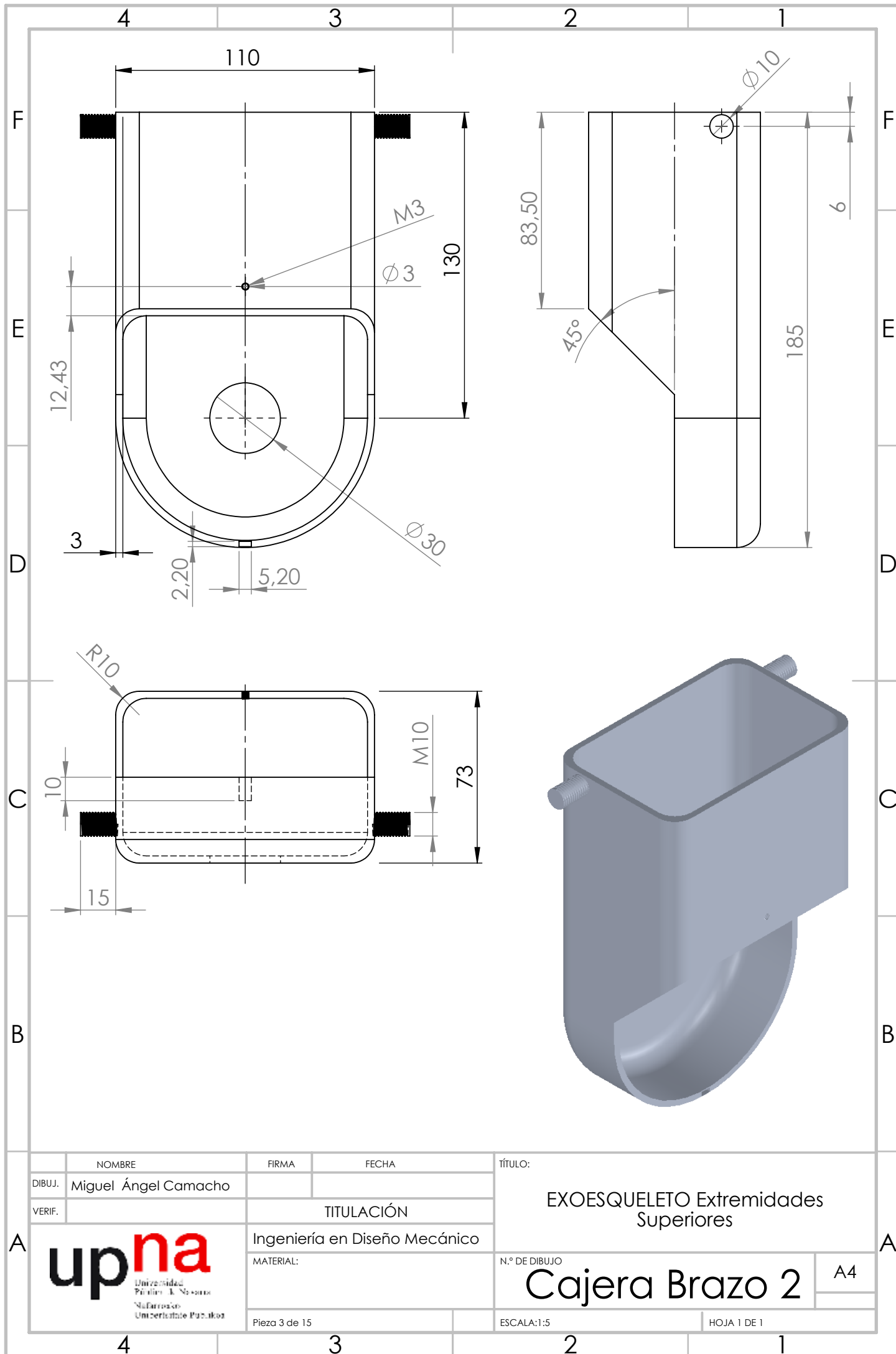
NOMBRE		FIRMA	FECHA	TÍTULO:	
DIBUJ.	Miguel Ángel Camacho			EXOSQUELETO Extremidades Superiores	
VERIF.		TITULACIÓN			
		Ingeniería en Diseño Mecánico		N.º DE DIBUJO Anclaje Estructura	
		MATERIAL:			
		Pieza 1 de 15		ESCALA: 1:2	

A4



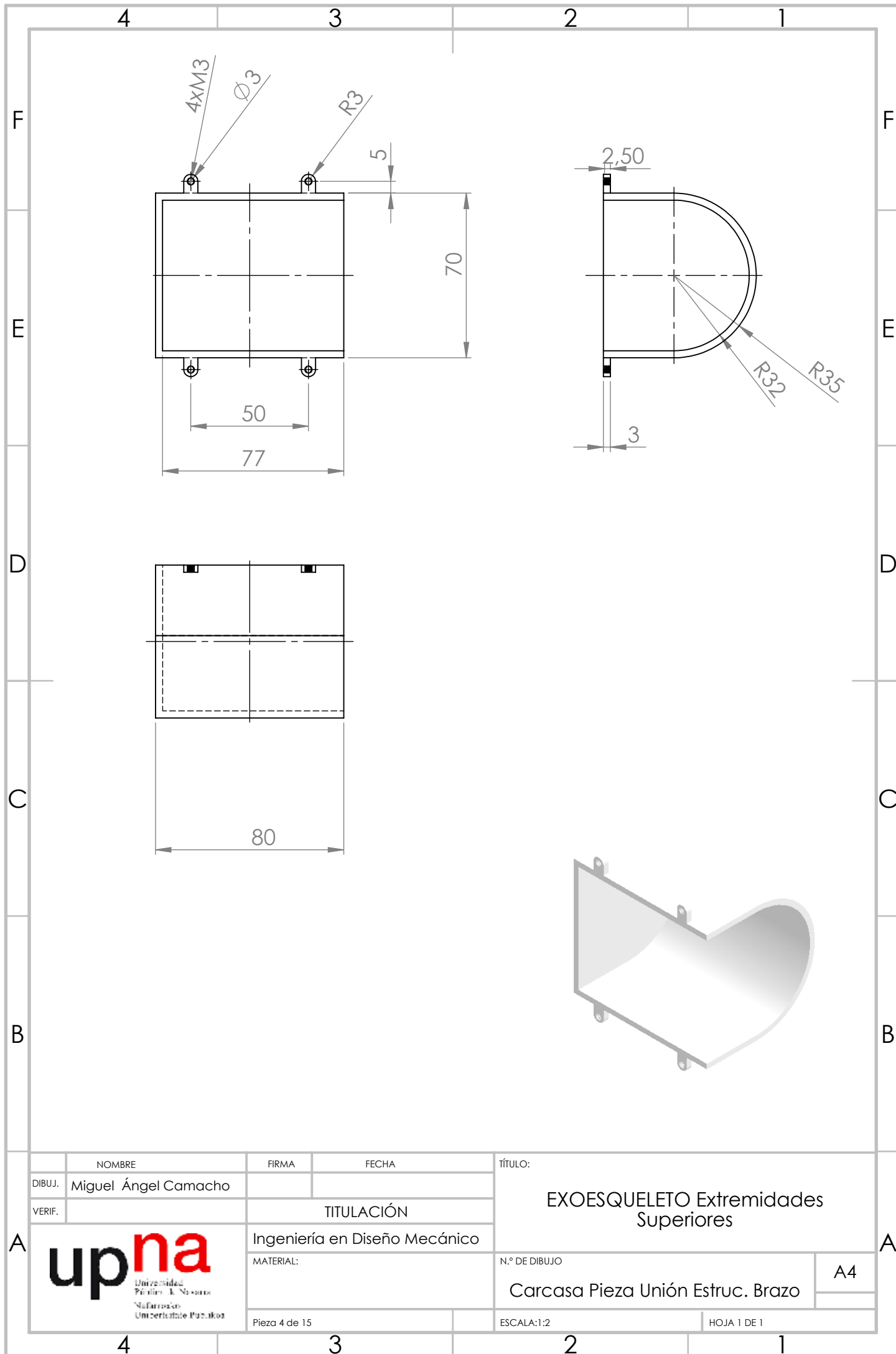
NOMBRE		FIRMA	FECHA	TÍTULO:	
DIBUJ.	Miguel Ángel Camacho			EXOESQUELETO Extremidades Superiores	
VERIF.		TITULACIÓN			
		Ingeniería en Diseño Mecánico		N.º DE DIBUJO	
		MATERIAL:		Cajera Brazo 1	
		Pieza 2 de 15		ESCALA: 1:5	
				HOJA 1 DE 1	

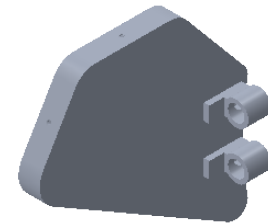
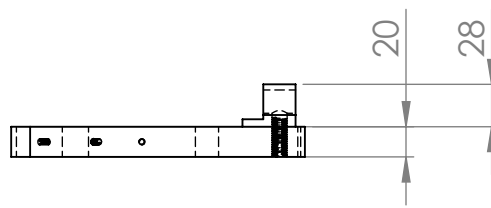
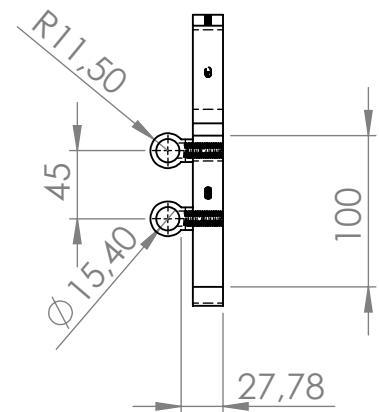
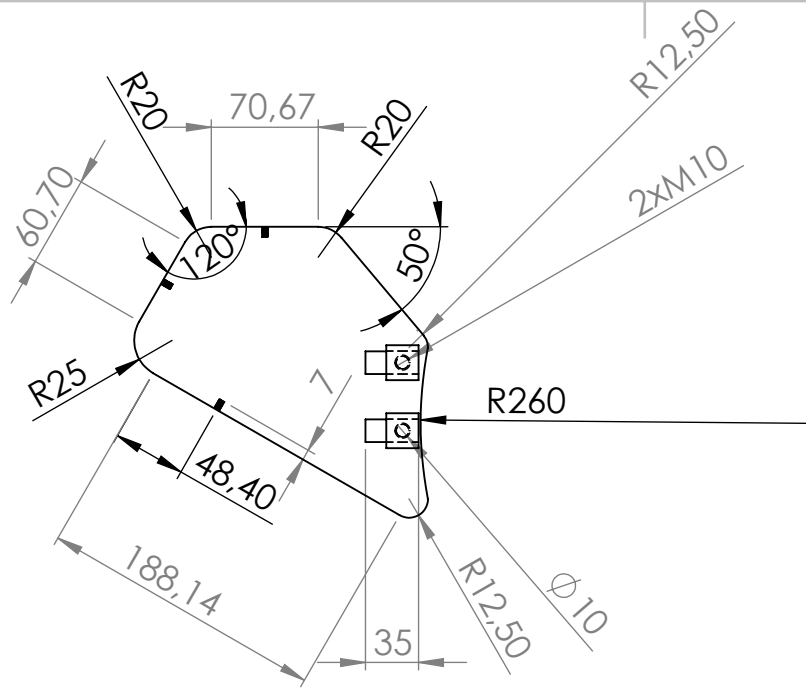
A4




	NOMBRE	FIRMA	FECHA
DIBUJ.	Miguel Ángel Camacho		
VERIF.		TITULACIÓN	
		Ingeniería en Diseño Mecánico	
		MATERIAL:	
		Pieza 3 de 15	

TÍTULO:	
EXOESQUELETO Extremidades Superiores	
N.º DE DIBUJO	A4
Cajera Brazo 2	
ESCALA:1:5	HOJA 1 DE 1

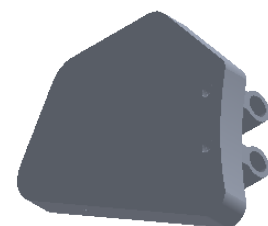
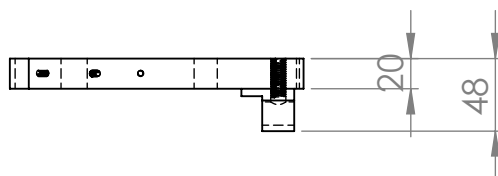
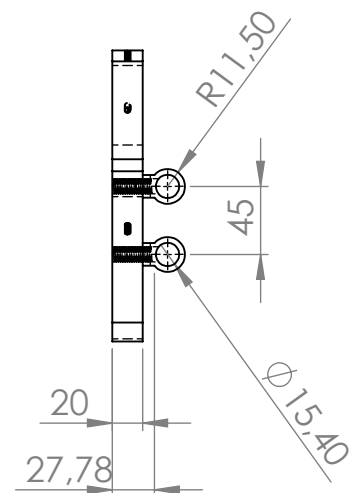
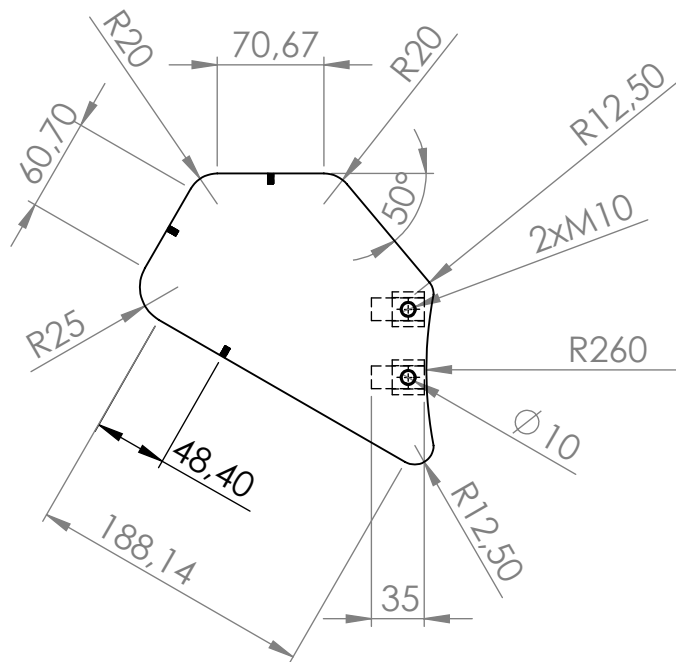





NOMBRE		FIRMA	FECHA	TÍTULO:	
DIBUJ.	Miguel Ángel Camacho			EXOESQUELETO Extremidades Superiores	
VERIF.		TITULACIÓN			
		Ingeniería en Diseño Mecánico		N.º DE DIBUJO	
		MATERIAL:			
		Pieza 5 de 15		ESCALA:1:5	

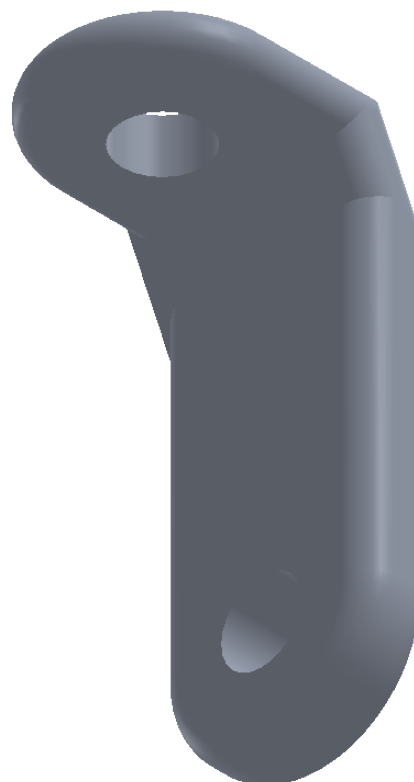
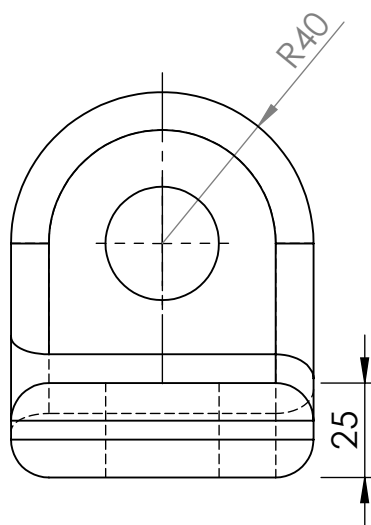
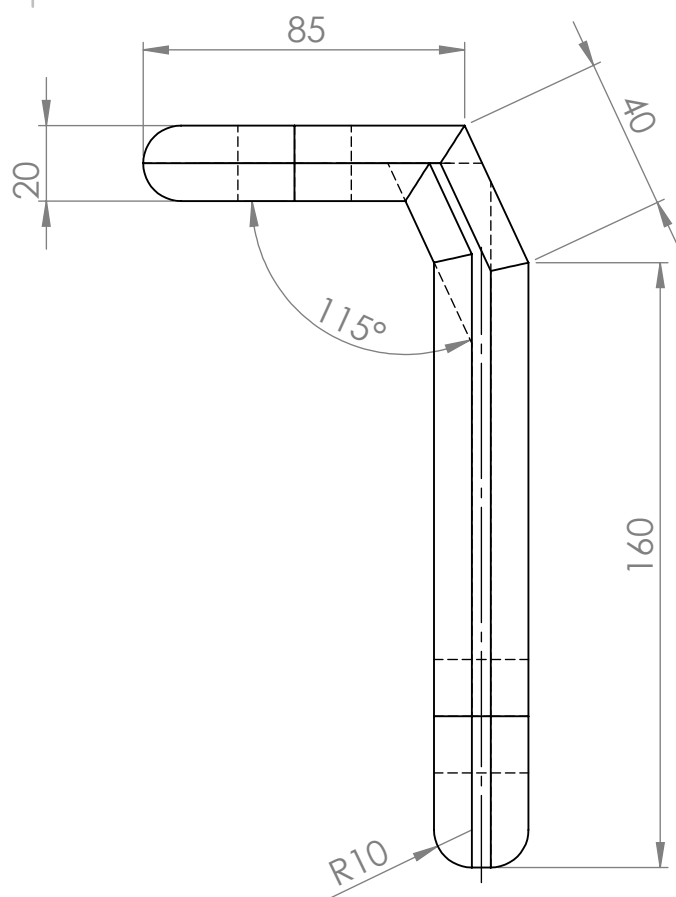
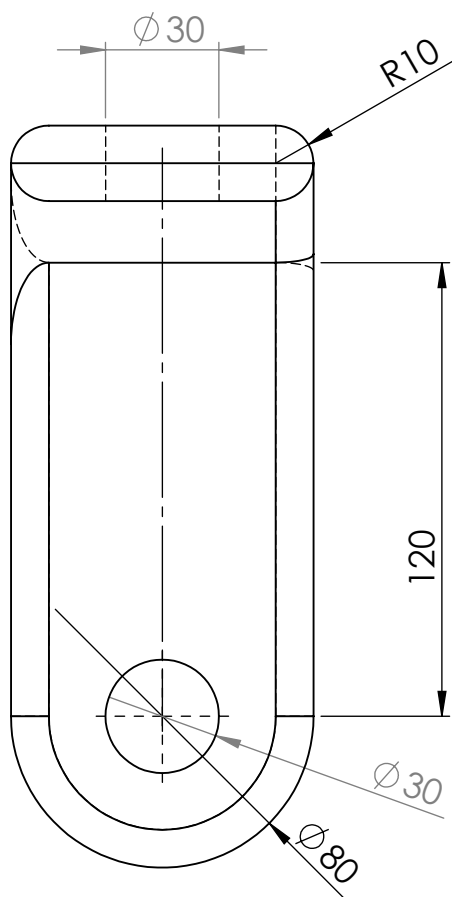
Hombro 2 Izq


A4



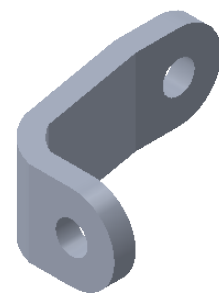
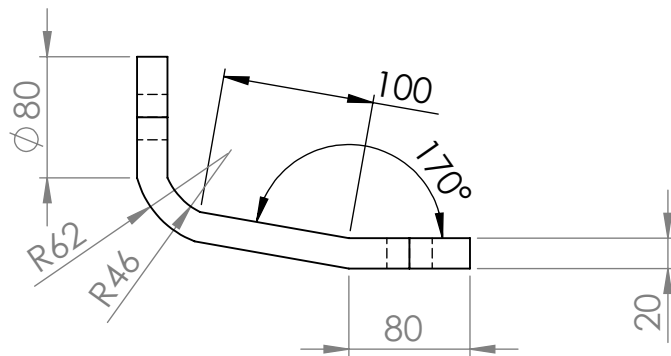
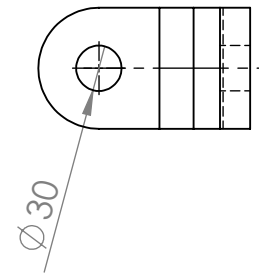
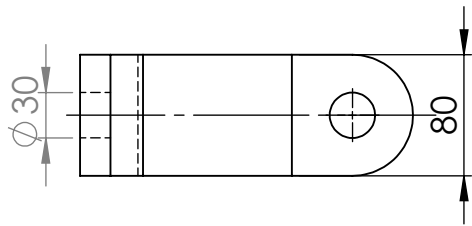
	NOMBRE	FIRMA	FECHA	TÍTULO:	
DIBUJ.	Miguel Ángel Camacho			EXOESQUELETO Extremidades Superiores	
VERIF.		TITULACIÓN			
		Ingeniería en Diseño Mecánico		N.º DE DIBUJO Hombro 2 Drch	
		MATERIAL:			
		Pieza 6 de 15		ESCALA:1:5	
				HOJA 1 DE 1	
				A4	


A4



NOMBRE		FIRMA	FECHA	TÍTULO:	
DIBUJ.	Miguel Ángel Camacho			EXOESQUELETO Extremidades Superiores	
VERIF.		TITULACIÓN			
		Ingeniería en Diseño Mecánico		N.º DE DIBUJO	
		MATERIAL:		Pieza Hombro 1	
		Pieza 7 de 15		ESCALA:1:2	
				HOJA 1 DE 1	

A4

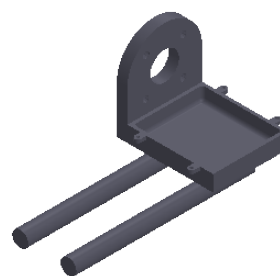
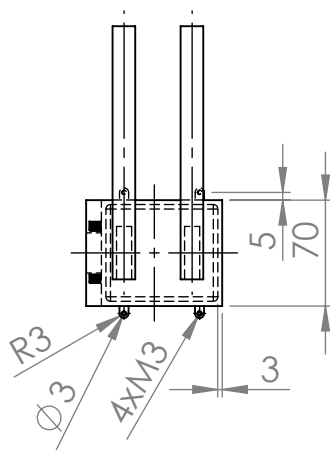
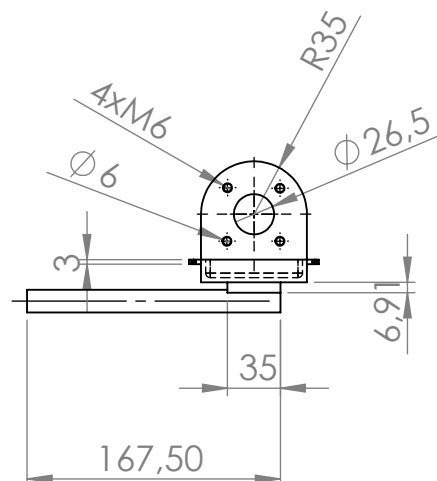
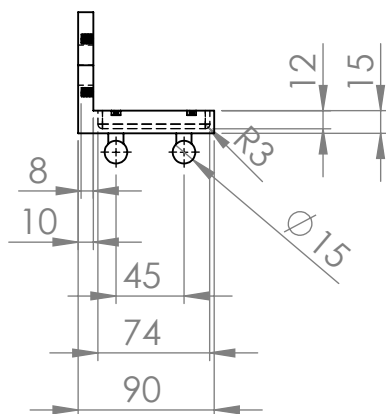



NOMBRE		FIRMA	FECHA	TÍTULO:	
DIBUJ.	Miguel Ángel Camacho			EXOESQUELETO Extremidades Superiores	
VERIF.		TITULACIÓN			
		Ingeniería en Diseño Mecánico		N.º DE DIBUJO	
		MATERIAL:		Pieza Hombro 2	
		Pieza 8 de 15		ESCALA: 1:5	
				HOJA 1 DE 1	



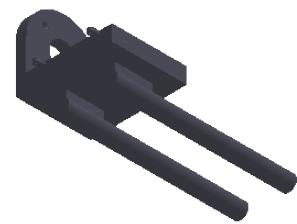
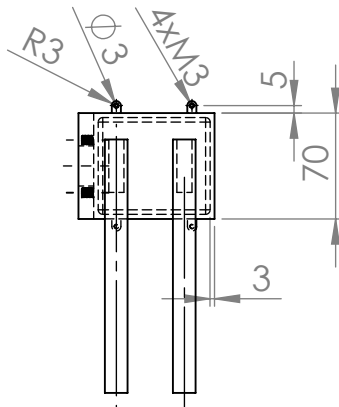
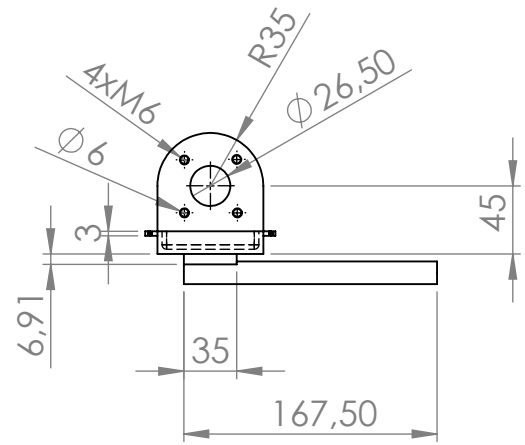
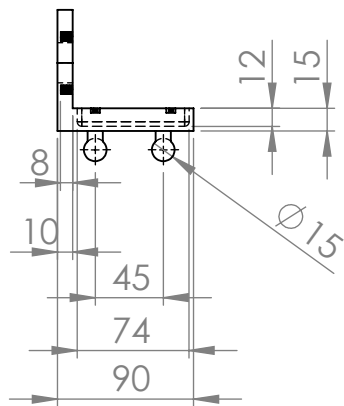
Pieza Hombro 2


A4



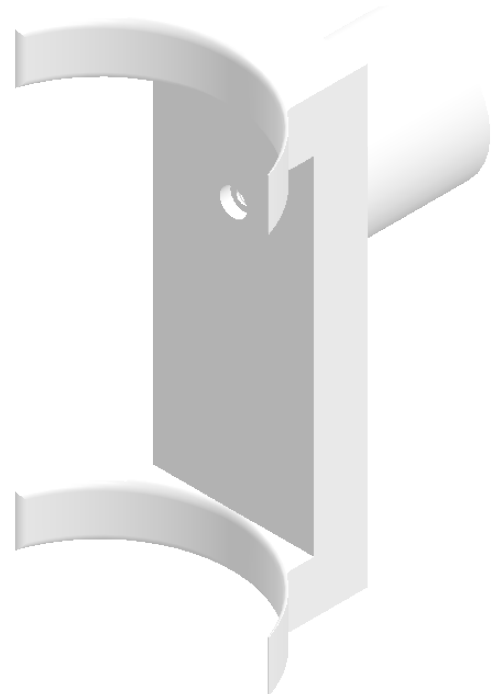
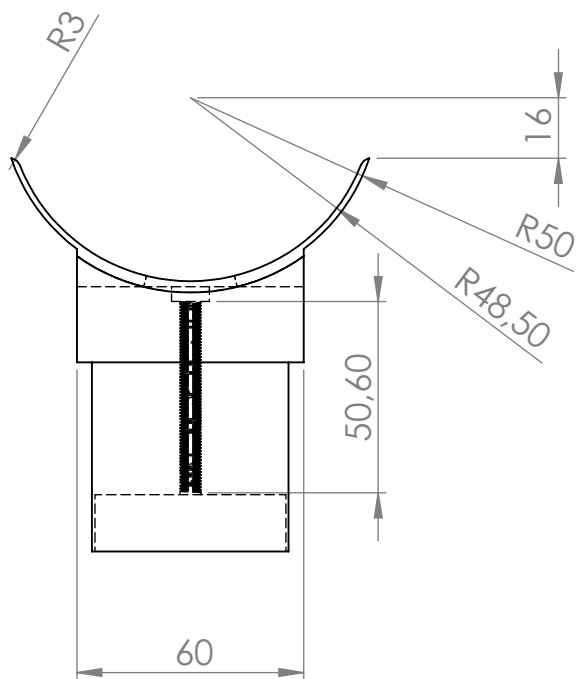
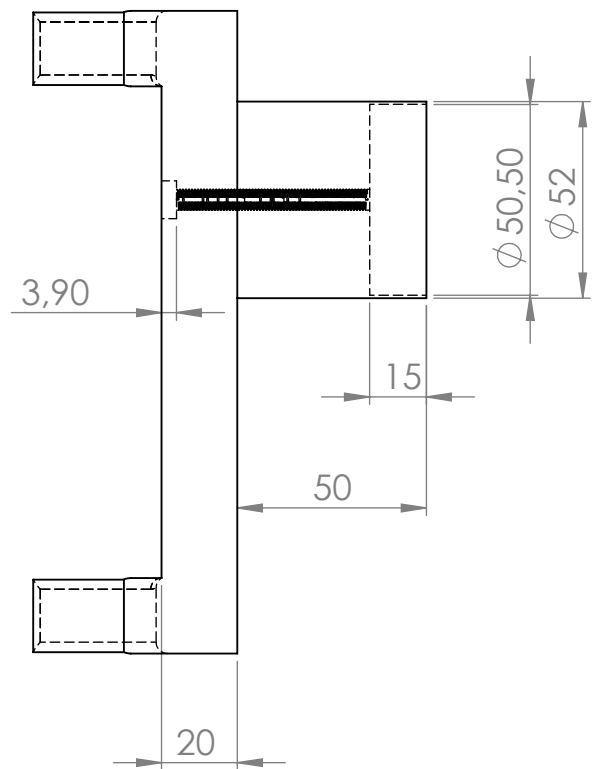
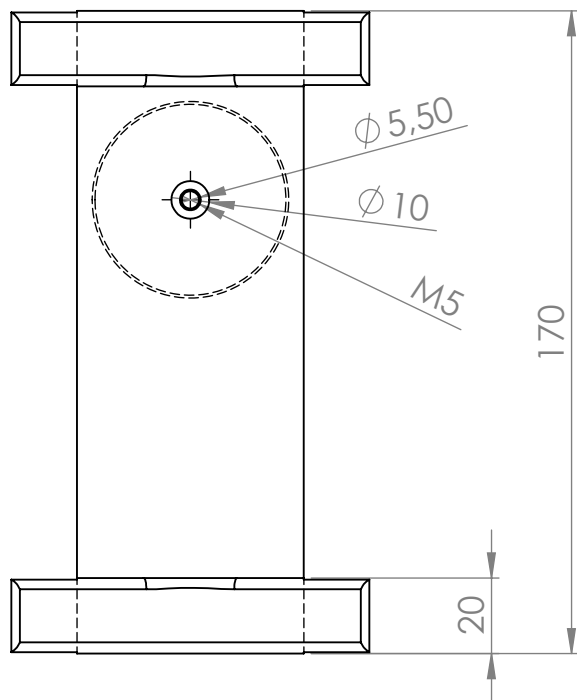
	NOMBRE	FIRMA	FECHA	TÍTULO:
DIBUJ.	Miguel Ángel Camacho			EXOESQUELETO Extremidades Superiores
VERIF.		TITULACIÓN		
A	 <p>Universidad Pública de Navarra Unibertsitatea Puzuzkoka</p>		Ingeniería en Diseño Mecánico	
			MATERIAL:	
			N.º DE DIBUJO	
	Pieza 9 de 15		Pieza Unión Estructura Brazo drch	
	ESCALA:1:5		HOJA 1 DE 1	

A4

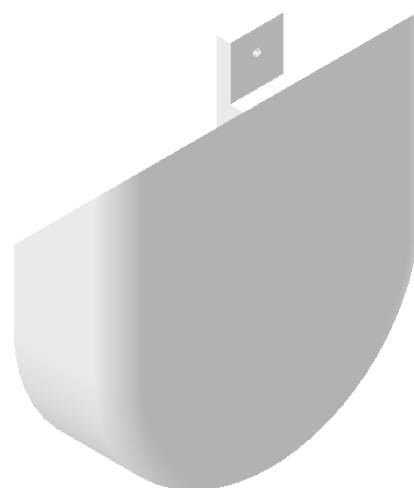
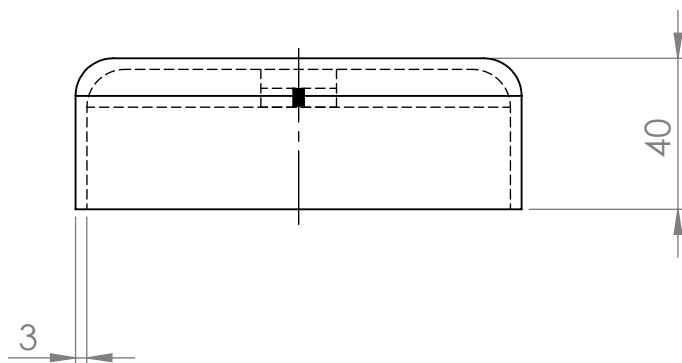
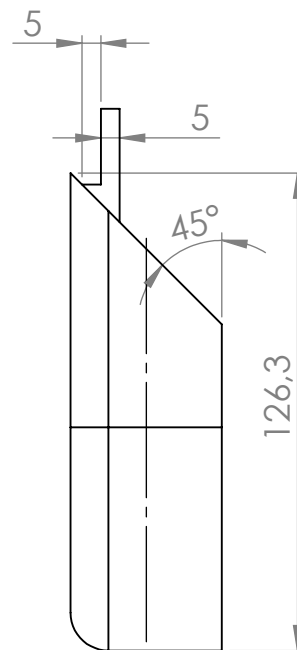
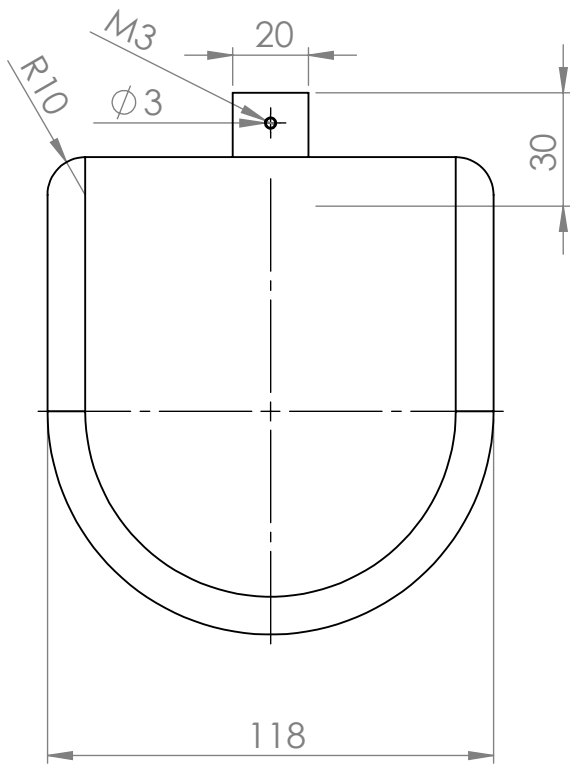


	NOMBRE	FIRMA	FECHA	TÍTULO:
DIBUJ.	Miguel Ángel Camacho			EXOESQUELETO Extremidades Superiores
VERIF.		TITULACIÓN		
A	 Universidad Politécnica de Navarra Universidad Pública	Ingeniería en Diseño Mecánico		N.º DE DIBUJO
		MATERIAL:		Pieza Unión Estructura Brazo Izq
		Pieza 10 de 15		ESCALA: 1:5

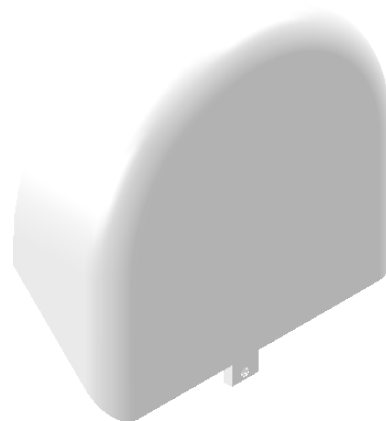
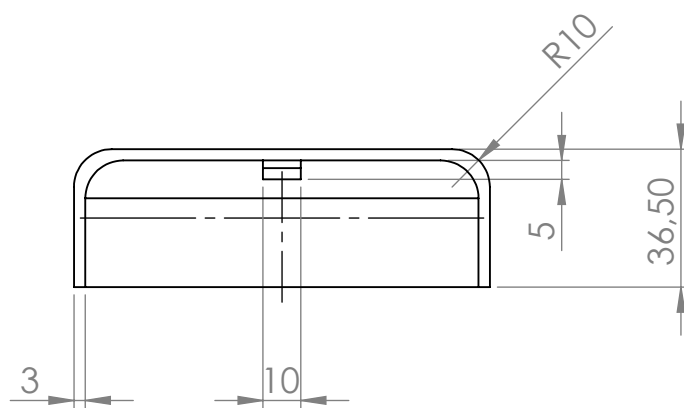
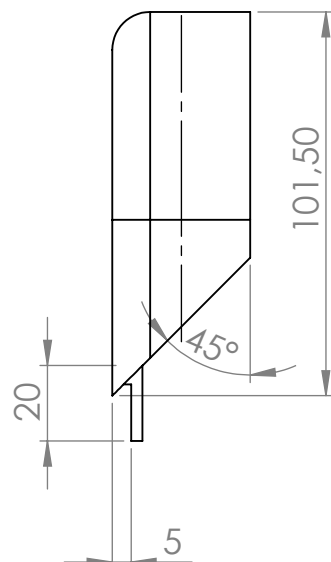
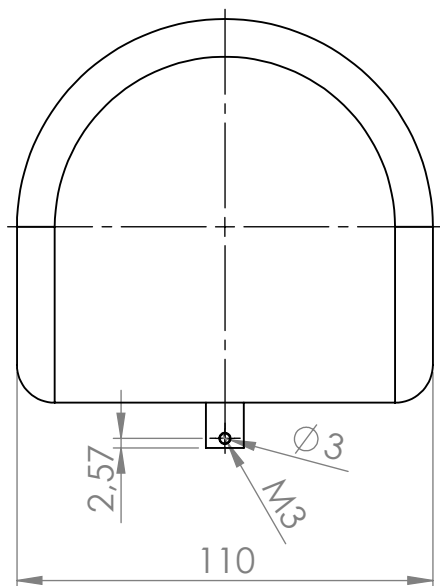
A4




NOMBRE		FIRMA	FECHA	TÍTULO:
DIBUJ.	Miguel Ángel Camacho			EXOESQUELETO Extremidades Superiores
VERIF.		TITULACIÓN		
upna		Ingeniería en Diseño Mecánico		N.º DE DIBUJO
Universidad Politécnica Nacional		MATERIAL:		Sujeción Brazo
Pieza 11 de 15		ESCALA:1:2		A4
		HOJA 1 DE 1		

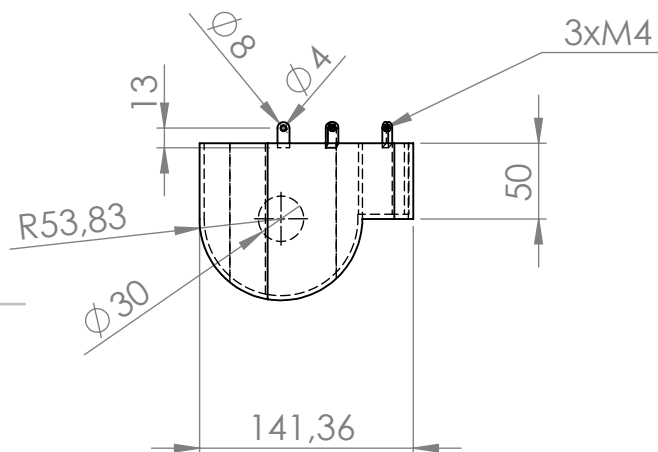
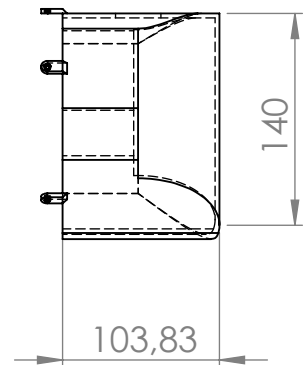
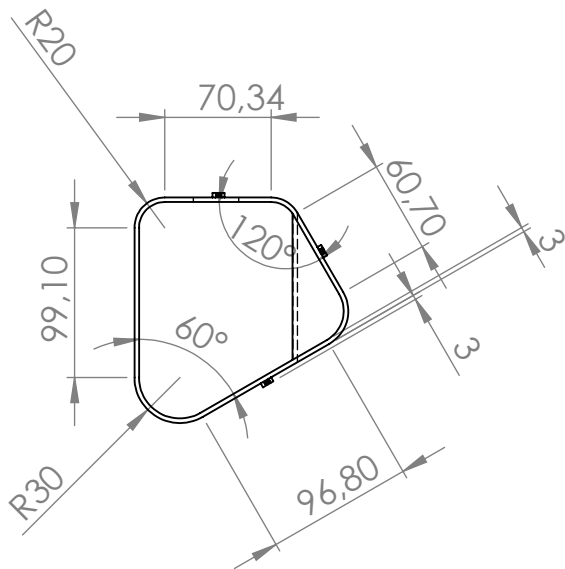



NOMBRE		FIRMA	FECHA	TÍTULO:	
DIBUJ.	Miguel Ángel Camacho			EXOSQUELETO Extremidades Superiores	
VERIF.		TITULACIÓN			
Ingeniería en Diseño Mecánico		MATERIAL:		N.º DE DIBUJO	
Pieza 12 de 15		ESCALA:1:2		HOJA 1 DE 1	

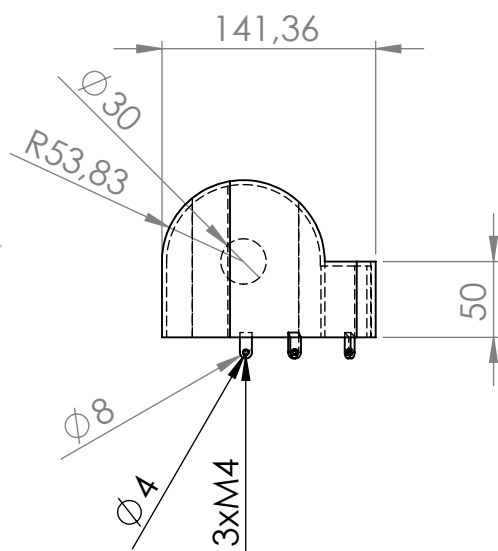
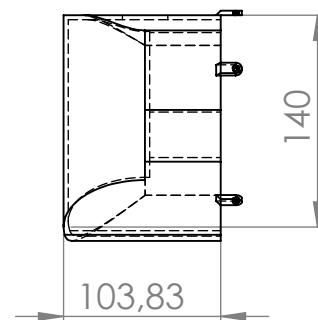
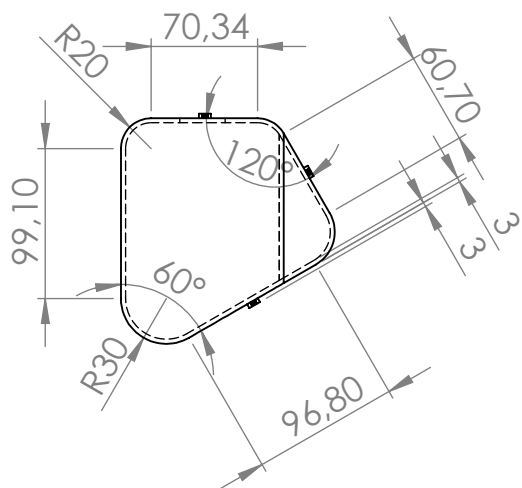



	NOMBRE	FIRMA	FECHA	TÍTULO:
DIBUJ.	Miguel Ángel Camacho			EXOESQUELETO Extremidades Superiores
VERIF.		TITULACIÓN		
A	 Universidad Pública de Navarra Universidad Pública	Ingeniería en Diseño Mecánico		N.º DE DIBUJO
		MATERIAL:		Tapa Brazo 2
		Pieza 13 de 15		ESCALA: 1:2
				HOJA 1 DE 1

A4



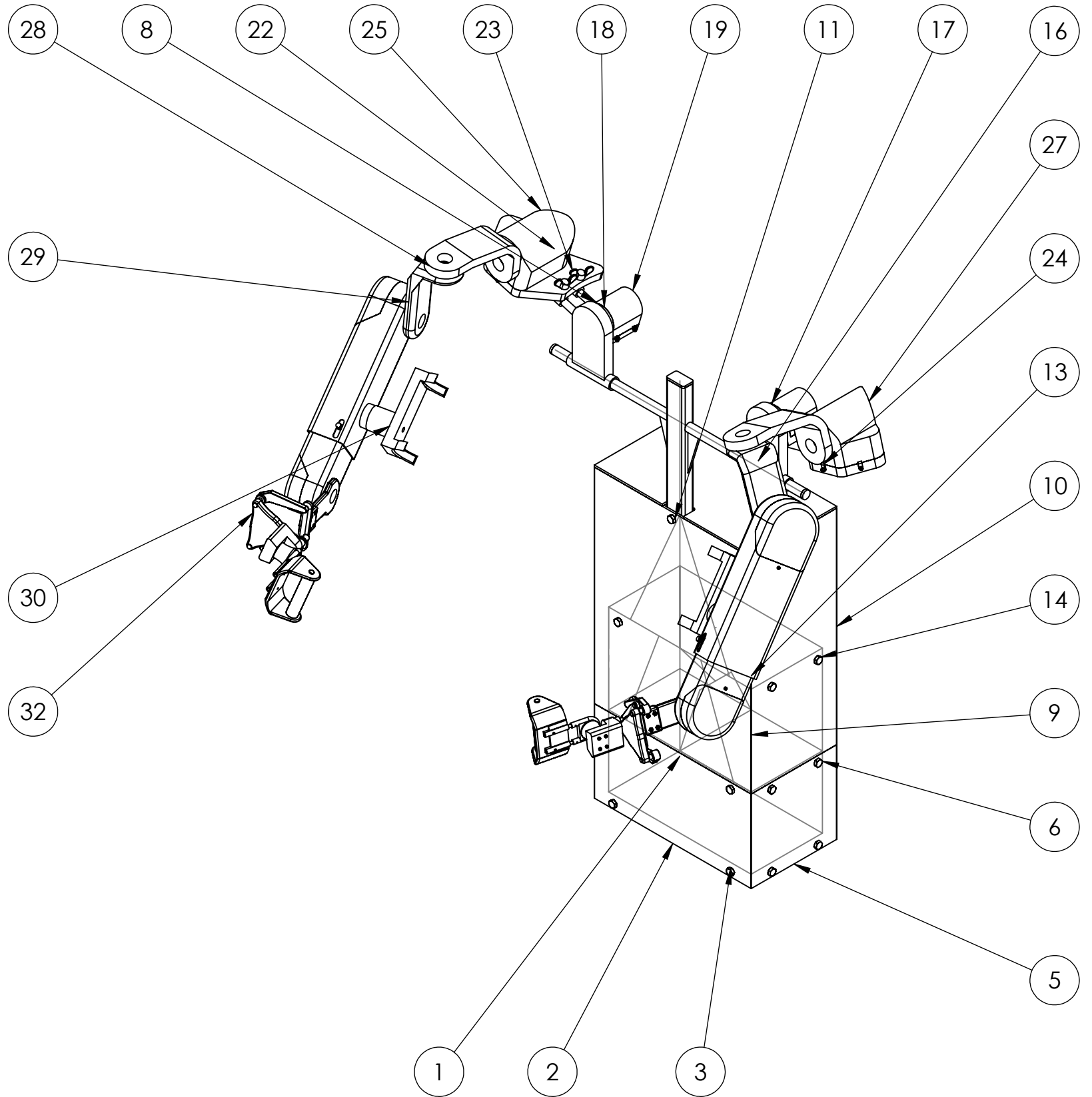
	NOMBRE	FIRMA	FECHA	TÍTULO:
DIBUJ.	Miguel Ángel Camacho			EXOESQUELETO Extremidades Superiores
VERIF.		TITULACIÓN		
A			Ingeniería en Diseño Mecánico	
			MATERIAL:	
			Pieza 14 de 15	
N.º DE DIBUJO			A4	
Tapa Hombro 2 Drch				
ESCALA: 1:5			HOJA 1 DE 1	



NOMBRE		FIRMA	FECHA	TÍTULO:	
DIBUJ.	Miguel Ángel Camacho			EXOESQUELETO Extremidades Superiores	
VERIF.		TITULACIÓN			
 <p>Universidad Pública de Navarra Unibertsitatea Puzakoa</p>		Ingeniería en Diseño Mecánico		N.º DE DIBUJO Tapa Hombro 2 Izq	
		MATERIAL:			
		Pieza 15 de 15		ESCALA:1:5	

A4

N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	CANTIDAD
1	Estructura_ok	1
2	Chapa1	2
3	DIN EN 24014 - M10 x 45 x 45-N	8
4	Hexagon Nut ISO 4034 - M10 - N	8
5	Chapa2	2
6	DIN EN 24014 - M10 x 45 x 45-N	8
7	Hexagon Nut ISO 4034 - M10 - N	8
8	final hombro	2
9	Chapa3	1
10	Chapa4	1
11	DIN EN 24016 - M10 x 45 x 45-WN	5
12	Hexagon Nut ISO 4034 - M10 - N	5
13	Chapalateral	2
14	DIN EN 24016 - M10 x 45 x 45-WN	4
15	Hexagon Nut ISO 4034 - M10 - N	4
16	Chapasuperior	1
17	carcasaultimo	1
18	Simetríacarcasaultimo	1
19	Tapacarcasaultimo	2
20	DIN 912 M3 x 10 --- 10S	8
21	Hexagon Nut ISO 4036 - M3 - S	8
22	hombro2izq	1
23	Wing screw DIN 316-M10X30	2
24	Simetríahombro2izq	1
25	tapahombro2	1
26	Wing screw DIN 316-M10X30	2
27	Simetríatapahombro2	1
28	hombrop	2
29	hombro_1	2
30	conjuntobrazoprueba_1	2
31	DIN 912 M4 x 10 --- 10S	6
32	Conjuntomuñeca_ok	2



NOMBRE		FIRMA	FECHA	TÍTULO:	
DIBUJ. Miguel Ángel Camacho				EXOESQUELETO Extremidades Superiores	
VERIF.		TITULACIÓN		N.º DE DIBUJO	
		Ingeniería en Diseño Mecánico		Ensamblaje final	
upna		MATERIAL:		ESCALA:1:20	
Universidad Pública de Navarra				HOJA 1 DE 1	
Nafarroako Unibertsitate Publikoa				A3	